

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

А. И. Грабченко, Е. А. Лымарь, В. А. Фадеев

ПРОЦЕССЫ МИКРО- И НАНОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Текст лекций

для студентов инженерных специальностей
дневной и заочной форм обучения

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 1 от 07.06.2013 г.

Харьков 2013

УДК 620.3-03

ББК 306

Г75

Рецензенты: *А.П. Тарасюк*, д-р техн. наук, проф., проректор Украинской инженерно-педагогической академии

В.А. Федорович, д-р техн. наук, проф. Национального технического университета «ХПИ»

В тексті лекцій розглянуто основні поняття систем мікро- та нанорізання, роль їхніх складових, методи отримання конструкційних та інструментальних наноструктурованих матеріалів, їхні властивості. Представлено умови трансформації механізмів руйнування матеріалів при стружкоутворенні в системах нанорізання, моделювання нанорізання з використанням методу молекулярної динаміки та моделювання повної тривимірної обробки поверхні, проведено порівняльний аналіз процесів традиційного та мікро- і нанорізання.

Призначено для студентів інженерних спеціальностей денної та заочної форм навчання.

Г75 Процессы микро- и нанорезания : текст лекций для студентов инженерных специальностей дневной и заочной форм обучения / Грабченко А.И., Лымарь Е.А., Фадеев В.А. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 166 с.

В тексте лекций рассмотрены основные понятия систем микро- и нанорезания, роль их составляющих, методы получения конструкционных и инструментальных наноструктурированных материалов, их свойства. Представлены условия трансформации механизмов разрушения материалов при стружкообразовании в системах нанорезания, моделирования нанорезания с использованием метода молекулярной динамики и моделирования полной трехмерной обработки поверхности, проведен сравнительный анализ процессов традиционного и микро- и нанорезания.

Предназначено для студентов инженерных специальностей дневной и заочной форм обучения.

Ил. 59. Табл. 20. Библиогр. 41 назв.

УДК 620.3-03

ББК 306

© Грабченко А.И., Лымарь Е.А., Фадеев В.А., 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
Тема 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	13
1.1. Основные термины и понятия.....	13
1.2. Элементарные объекты нанотехнологии.....	15
1.3. Понятие о макро-, микро- и нанообработке	15
1.4. Нанообъекты системы резания и их размерный диапазон	16
Заключение	18
Тема 2. ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ (НСМ)	20
2.1. Атомно-молекулярные манипуляции	20
2.2. Два подхода в получении наноструктурированных объектов	23
2.3. Способы получения наноструктурированных материалов	23
2.3.1. Получение нанопорошков	23
2.3.2. Получение наноматериалов.....	26
2.4. Принципы классификации наноструктурированных материалов	29
2.5. Нанотехнологии в изготовлении режущих инструментов как нанообъектов системы резания	31
Заключение	32
Тема 3. СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	34
3.1. Факторы, предопределяющие особые свойства наноматериалов.....	34
3.2. Физико-механические свойства НСМ	36
3.3. Устойчивость особых свойств НСМ	39
Заключение	40
Тема 4. СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОПОКРЫТИЙ.....	41
4.1. Потенциал нанострурированных инструментальных материалов и покрытий	41
4.2. Режущий инструмент как нанообъект системы нанорезания	43
4.3. Функциональная роль нанослойных покрытий на режущем инструменте	43
4.4. Свойства нанопокровтий и инструментальных наноматериалов ..	44
Заключение	46

Тема 5. УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА НАНОРЕЗАНИЯ	
МАТЕРИАЛОВ.....	47
5.1. Роль нанообъектов системы нанорезания	47
5.2. Концепция взаимодействия энергетических полей нанообъектов системы нанорезания	48
5.3. Преобразование свойств материалов в процессе нанорезания.....	50
5.4. Роль высокого давления	51
Заключение.....	52
Тема 6. ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ	
МАТЕРИАЛОВ ПРИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИИ	
В СИСТЕМАХ НАНОРЕЗАНИЯ.....	54
6.1. Сущность перехода от хрупкого к пластическому механизму разрушения материала	54
6.2. Роль гидростатического давления при реализации пластического режима стружкообразования.....	55
6.3. Влияние толщины срезаемого слоя и величин радиуса округления режущей кромки на режим стружкообразования.....	56
6.4. Влияние режима стружкообразования на качество обработанной поверхности.....	58
Заключение.....	59
Тема 7. АЛМАЗНОЕ НАНОТОЧЕНИЕ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ.	
ОСОБЕННОСТИ РЕЗАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ	
МАТЕРИАЛОВ	60
7.1. Алмазное наноточение хрупких материалов.....	60
7.2. Условия реализации обработки в пластическом режиме	62
7.3. Особенности резания наноструктурированных материалов	64
7.4. Изменение исходных свойств наноматериалов в процессе обработки.....	65
Заключение.....	66
Тема 8. МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРО- И НАНОРЕЗАНИЯ.	
ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ	
ДИНАМИКИ	68
8.1. Инжиниринг систем микро- и нанорезания.....	68
8.2. Моделирование процессов при изучении взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом на наноуровне.....	69
8.3. Пример MD моделирования системы нанорезания	70

8.4. Условия реализации моделирования методом молекулярной динамики	72
Заключение	73
Тема 9. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ МИКРО- И НАНОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ.....	75
9.1. Моделирование процесса ортогонального микро- и нанорезания материалов	75
9.2. Моделирование процессов нанорезания в пластическом режиме стружкообразования	78
9.3. Недислокационный механизм пластичности	81
Заключение	82
Тема 10. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНОРЕЗАНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ	84
10.1. Особенности моделирования процесса нанорезания хрупких материалов.....	84
10.2. Обработка хрупких материалов в пластическом режиме.....	85
10.3. Особенности формирования поверхности и приповерхностного слоя	87
Заключение	87
Тема 11. СИЛЫ РЕЗАНИЯ, ТЕМПЕРАТУРА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ МИКРО- И НАНОРЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ	89
11.1. Силы резания в нанометрическом диапазоне	89
11.2. Напряжения в процессе нанорезания	92
11.3. Определение температуры нанорезания	95
Заключение	97
Тема 12. УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ МИКРО- И НАНОШЛИФОВАНИЯ	99
12.1. Общая характеристика процессов микро- и nanoшлифования ...	99
12.2. Классификация процессов микро- и nanoшлифования	100
12.3. Условия перехода от хрупкого к пластическому режиму микро- и nanoшлифования	102
12.4. Влияние условий нанорезания на съем материала	105
12.5. Качество обработанной поверхности	105
Заключение	107

Тема 13. РОЛЬ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МИКРО- И НАНОШЛИФОВАНИЯ.....	109
13.1. Классификация абразивных инструментов, применяемых для микро- и наношлифования.....	109
13.2. Влияние абразивных зерен на процесс микро- и наношлифования	113
13.3. Роль связки в реализации процесса шлифования в нанометрическом диапазоне.....	115
Заключение.....	116
Тема 14. УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ.....	118
14.1. Управление состоянием инструмента при микро- и наношлифовании	118
14.2. Классификация процессов микро- и наношлифования	121
14.3. Применение СОТС при микро- и наношлифовании	123
14.4. Моделирование полной трехмерной обработки поверхности.....	124
Заклучение.....	126
Тема 15. СРАВНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ТРАДИЦИОННОГО (МАКРО-), МИКРО- И НАНОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ	128
15.1. Сравнение процессов традиционного, микро- и нанорезания.....	128
15.2. Принципиальные особенности процессов микро- и нанорезания	131
15.3. Тенденции развития	132
15.4. Хронология развития нанонауки, нанотехнологии, нанопроизводства	133
Приложение А.....	140
Приложение Б	141
Приложение В.....	145
Приложение Г	146
Приложение Д.....	148
Приложение Е	150
Приложение Ж.....	152
Приложение З.....	156
Приложение И.....	159
Приложение К.....	160
Список рекомендуемой литературы	162

Не существует такой категории наук, которые можно было бы назвать прикладными. Существует Наука и ее применение в жизни, связанные между собой так, как плод с тем деревом, на котором он созрел.

Л. Пастер

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроение требует сочетания высокого уровня и качества изделий с высокой производительностью и гибкостью производства. Высокая точность формы и качество поверхностей в механических, оптических и электронных компонентах могут значительно улучшить качество, ассортимент и эксплуатационные возможности конечного продукта. Таким образом, традиционные процессы обработки требуют дальнейшего развития для того, чтобы обрабатывать компоненты, которые соответствуют назначению на микро- и наноуровнях. Решению этой задачи может способствовать реализация потенциала нанотехнологий и по сути потенциала нового более высокого технологического уклада производства, основанного на знаниях, технике переработки и доставки информации, помогающей решению различных творческих задач, а также управляющей огромными производственными комплексами автоматического оборудования.

Современная техника, достижения наук в области информатики позволяют рассматривать процессы, происходящие в зоне резания, на атомно-молекулярном уровне, а составляющие системы микро- и нанорезания как объекты, совокупность и взаимодействие которых способны выявлять новые эффекты, ранее не известные. Выросло новое поколение инструментального обеспечения процессов микро- и нанорезания, например, нанодатчики, способные быть установленными в материал на производственной стадии. Их характеристики способны давать сигналы о состоянии материала, температуре, напряжении и т. д. не деструктивным путем.

За последние десятилетия нанотехнологии стали стратегическим индустриальным направлением. В настоящее время более 50 стран ведут исследования и разработки в области нанотехнологии и не менее 30 стран имеют

свои национальные программы в этой области, на развитие которых ведущие экономические державы тратят сегодня миллиарды долларов (рис. 1, 2).



Рисунок 1– Инвестиции в нанотехнологии (\$ млн)



Рисунок 2 – Объем рынка нанотехнологий

Фундаментальные исследования по проблемам нанотехнологий ведутся и в Украине, например, в рамках комплексной программы НАН Украины «Наноструктурные системы, наноматериалы, нанотехнологии», украинско-российской программы «Нанофизика и наноэлектроника» и др. Интенсивность научных исследований в области нанотехнологий характеризуется экспоненциальным ростом научных публикаций и количеством патентов. В на-

стоящее время более 20-ти международных журналов посвящены исключительно наноматериалам и нанотехнологиям. Кроме того, все материаловедческие журналы публикуют статьи по наноматериалам и нанотехнологиям. Появляются новые монографии, сборники трудов, учебные пособия, посвященные различным проблемам нанотехнологий.

Пока все нанотехнологические материалы стоят очень дорого. Но, как и в случае компьютерной отрасли, массовое производство приведет к резкому снижению цены (рис. 3). В невидимой борьбе за те прибыли и влияние, которое даст нанотехнология, основными игроками являются США, Китай, и Россия. Израиль, Европейские страны и страны Латинской Америки стремительно наращивают свой потенциал в этой области. К сожалению, несмотря на наличие хорошей научной базы и крупных частных капиталов, Украинские научные разработки и прикладные продукты в мире представлены слабо.

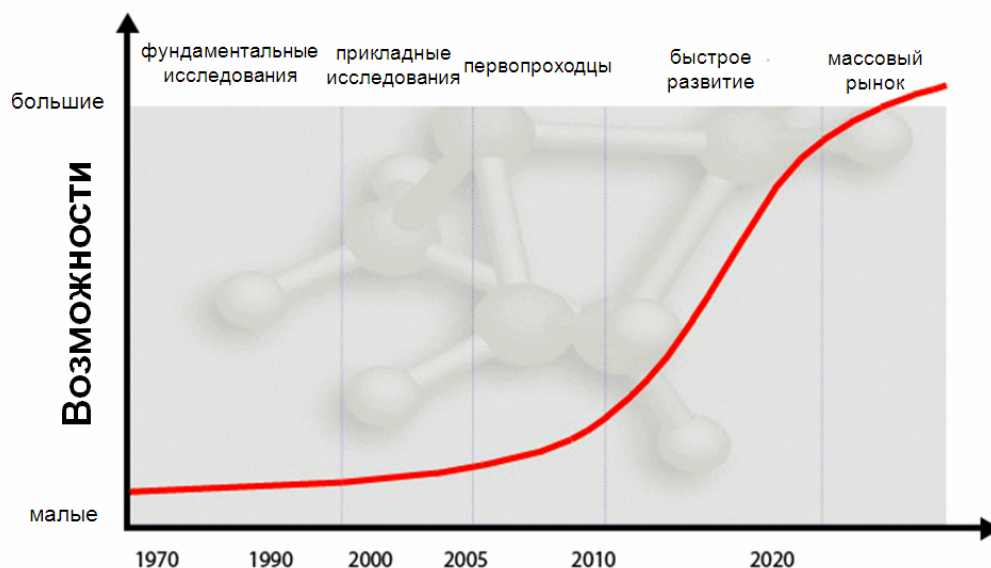


Рисунок 3 – Прогнозируемый рост нанотехнологий

Особую важность для нанотехнологических разработок имеют научные национальные нанотехнологические программы. Поэтому важность своих, украинских нанотехнологических научных исследований и разработок очень высока. Каждый день игнорирования важности нанотехнологий делает нашу страну более архаичной и неконкурентной. В связи с этим создание учебной дисциплины «Процессы микро- и нанорезания материалов» для обучения студентов высших учебных заведений является чрезвычайно важным для формирования специалистов украинской наноиндустрии.

Решению этой проблемы должна способствовать реализация потенциала высоких технологий, прежде всего нанотехнологий.

Целью процессов микро- и нанорезания является создание элементов с высоким качеством финишных поверхностей, высокой точностью формы, чистотой поверхностей и требуемым состоянием приповерхностного слоя. Микро- и нанорезание являются новыми технологическими областями, которые дают возможность производить компоненты с микро- и нанометрической точностью, где допуски на отклонение размеров формы и требуемая шероховатость должны обеспечиваться за одну операцию во избежание дополнительной обработки (полирование, обработка свободными абразивами). Механическая нанообработка имеет больше преимуществ, чем другие методы, поскольку она способна обрабатывать сложные трехмерные компоненты управляемым образом. Метод необходим, например, для производства сложных микро- и наноструктур, компонентов и продуктов из разнообразных конструкционных материалов.

Таким образом, в современном обществе микро- и нанорезание становится чрезвычайно важными с технологической и экономической точки зрения. Микро- и нанообработка стала предметом сосредоточения исследовательских интересов производственных предприятий, производящих различные технологические продукты. Этой области присущи проблемы, связанные с междисциплинарным характером нанотехнологий в общем, и нанорезания в частности.

Освоение учебной дисциплины «Процессы микро- и нанорезания материалов» студентами высших учебных заведений инженерных специальностей позволит:

- усвоить основные понятия и определения дисциплины, рассмотреть принципиальные особенности систем нанорезания различных уровней;
- проанализировать информацию о влиянии нанообъектов на качество обработанной поверхности, структуру поверхности, топографию и функциональные свойства при нанообработке резанием;
- обобщить результаты исследований трансформации механизмов разрушения при стружкообразовании в системах нанорезания;
- определить основные направления моделирования процессов нанорезания материалов;
- выделить особенности механизма взаимодействия инструмента с обрабатываемыми материалами и стружкой в нанометрическом диапазоне;

- рассмотреть процессы микро- и наношлифования в системе нанорезания;
- проиллюстрировать физические особенности нанорезания на примере обработки наноструктурированных материалов.

Успешному усвоению курса «Процессы микро- и нанорезания материалов» будет способствовать разработка учебно-методического сопровождения, в частности: опорного конспекта лекций; рабочей учебной программы; комплексной контрольной работы; учебной программы; образовательно-квалификационной характеристики; образовательно-профессиональной программы.

Объект разработки. Объектом разработки является создание содержания учебно-методического сопровождения курса «Процессы микро- и нанорезания материалов».

Конспект лекций составлен на основе результатов новейших достижений в процессах микро- и нанорезания, предложенных различными авторами, новых методологических подходов к изучению процесса взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом и стружкой на наноуровне. Рассмотрено моделирование процессов нанорезания материалов для изучения трансформации механизмов разрушения при стружкообразовании в системах нанорезания.

Впервые в Украине создана учебная дисциплина для студентов высших учебных заведений, рассматривающая процессы резания, происходящие на микро- и наноуровне. Содержание дисциплины базируется на:

- впервые предложенной концепции идеальной системы нанорезания, а также таких систем, в составе которых не все объекты являются нанообъектами;
- изложении принципов взаимодействия полей, которые дополняют традиционные методы изучения и совершенствования процессов резания;
- на доказательстве того, что познание на наноуровне механизмов преобразования свойств материалов в процессе резания дает возможность целенаправленно управлять воздействием на материалы заготовок для достижения новых высоких показателей производительности, качества и экономичности обработки.

Принципиальными особенностями процессов микро- нанорезания являются:

- стружкообразование в пластическом режиме, которое обнаруживается при толщинах срезаемого слоя меньше, чем радиус закругления режущей кромки r . Существует и верхняя граница толщин для этого радиуса, за пределами которой пластический режим стружкообразования снова трансформируется в хрупкий;
- существенная роль гидростатического давления и температуры в зоне резания для формирования режима пластической деформации при разрушении хрупких материалов;
- возможность получения качества обработанной поверхности при нанорезании лезвийным инструментом того же уровня, что и при полировании;
- значительное влияние скорости резания на нанопроцесс снятия материала, формирование наностружки, существенное изменение формы наностружки, механизма образования, локализация зоны деформации;
- высокая температура, наблюдаемая на режущей кромке: именно на режущей кромке происходят деформационные сдвиги материала заготовки; большую роль в тепловых процессах играет износ алмазного инструмента;
- структура приповерхностного слоя при хрупком и пластическом режимах наношлифования;
- возможность реализации моделирования полной трехмерной обработки поверхности, что обеспечивает основу для анализа трехмерной шероховатости поверхности и остаточных напряжений.

Сравнительная характеристика нанометрической и традиционной механической обработки завершает изложение лекционного материала.

Приложение состоит из описания лекционной дисциплины, учебной программы, рабочей учебной программы, комплексной контрольной работы (30 вариантов), критериев оценки выполненных заданий, перечня справочной литературы, образовательно-квалификационной характеристики, образовательно-профессиональной программы.

*Овладей предметом,
а слова найдутся.
Гораций*

Тема 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

План:

- 1.1. Основные термины и понятия.
 - 1.2. Элементарные объекты нанотехнологии.
 - 1.3. Понятие о макро-, микро- и нанообработке.
 - 1.4. Нанообъекты системы резания и их размерный диапазон.
- Заключение.

1.1. Основные термины и понятия

Мир, окружающий человека, полон убедительных свидетельств наличия удивительных явлений и эффектов, обнаруживаемых в нанометричной области. Однако исторически сложилось так, что человечество, развиваясь и познавая окружающую природу, обращало свои взоры преимущественно на предметы и явления макромира. В настоящее время, характеризующееся бурным развитием инструментов познания, методов и средств моделирования, информационных технологий, ученые, работники различных отраслей производства, медицины, сельского хозяйства, бизнесмены, финансисты и др. огромное внимание уделяют изучению объектов, различных явлений и эффектов в нанометрической области (до 100 нм). Речь идет о возможном практическом использовании нанотехнологий, являющихся междисциплинарным направлением науки в комплексе, охватывающем различные разделы физики, механики, химии, биологии, электроники и т. д. Среди многих слов с приставкой «нано», ставших уже привычными (нанонаука, наномедицина, наноробот, нанотрубка, нанообъект и т.д.), появилось и понятие «нанорезание». Рассмотрим основные понятия и определения, относящиеся к нанометрическому диапазону.

Первая часть сложных слов *нано* происходит от греческого *NANOS* – карлик, в метрологии нанометр соответствует миллиардной доле метра: 1 на-

нометр равен 10^{-9} м. Приставку «нано» используют в значении «относящийся к нанодиапазону» или «относящийся к нанотехнологиям».

Микро происходит от греческого слова *МИКРОС* – малый, означающий малость (в противоположность *макро*) чего-либо (микроклимат, микроорганизм, микропроцессор, микрорайон, микроскоп, микромир и др.). Один микрометр соответствует одной миллионной (10^{-6}) части исходной единицы измерения – метра. Обе части нано и микро идентифицируют характеристические геометрические размеры изучаемых объектов.

Нанообъект – материальный объект, геометрические параметры которого хотя бы в одном направлении не превышают 100 нанометров, благодаря чему он приобретает, как правило, принципиально новые свойства: наночастица, нанопора, нанопластина, нанослой, нанокристалл и др.

Нанодиапазон – это интервал пространственной шкалы 0,1–100 нм, в котором реализуются основные взаимодействия нанообъектов.

Нанокристалл – единица наноструктуры, наименьшее количество вещества в кристаллической форме.

Нанокластеры (атомные кластеры) – структуры размером до 10 нм, состоящие из небольшого числа атомов.

Наноструктура – два или более нанокристалла, соединенные между собой силами Ван-дер-Ваальса.

Наносистема – материальный объект в виде упорядоченных или самоупорядоченных, связанных между собой элементов с нанометрическими характеристическими размерами, объединение которых предопределяет возникновение у объекта принципиально новых свойств, явлений, эффектов и процессов, связанных с проявлением наномасштабного фактора.

Наноматериал – вещества или их композиции, представляющие собой искусственно или естественно упорядоченную или не упорядоченную систему базовых элементов с нанометрическими характеристическими размерами и особым проявлением физико-химического взаимодействия, обеспечивающих возникновение и проявление ранее не известных механических, физических, химических и других свойств, определяемых наномасштабным фактором.

Главными причинами появления таких свойств при переходе к наноразмерным системам является изменение доли вклада в различные процессы поверхностных атомов частицы по отношению ко всему объекту, усиление в условиях наноконпозиций роли различных видов размерных эффектов из-за значительной площади границ раздела.

Нанонаука – система знаний, основанная на описании, объяснении и предсказании свойств как материальных объектов с нанометрическими характеристическими размерами, так и систем более высокого размерного уровня (упорядоченных или самоупорядоченных) на основе наноразмерных элементов.

Нанотехнология – совокупность методов и способов синтеза, сборки, структуро- и формообразования, нанесения, удаления и модифицирования материалов, включая систему знаний, навыков, умений, аппаратное, метрологическое, информационное обеспечение процессов и технологических операций, направленных на создание материалов и систем с новыми свойствами, обусловленными проявлением наномасштабных факторов. Нанотехнологию определяют еще как «науку и технологию, где измерения и отклонения (допуски), находящиеся в диапазоне от 0,1 нм до 100 нм, играют важнейшую роль».

1.2. Элементарные объекты нанотехнологии

Элементарными объектами нанотехнологии (наномасштабными, наноразмерными элементами), позволяющими искусственно конструировать функциональные материалы с заранее заданными свойствами и структурой, являются атомы, молекулы, атомные кластеры и частицы, нанопорошки, нанослойные покрытия, нанотрубки и фуллерены, квантовые ямы, проволоки, точки и др. В частности, наночастицами принято называть образования из связанных атомов или молекул с размерами < 100 нм (рис. 1.1).

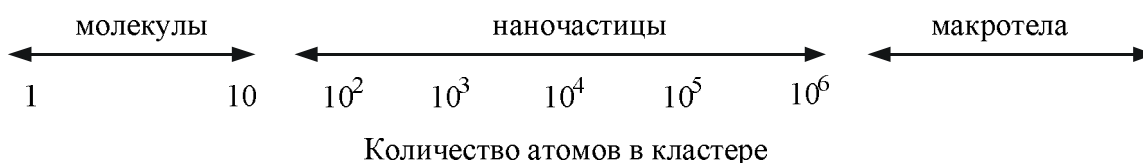


Рисунок 1.1 – Количество атомов в кластере и различие между молекулой, наночастицей и макротелом

1.3. Понятие о макро-, микро- и нанообработке

В зависимости от предельно достижимой точности, которая обеспечивается рассматриваемыми процессами резания, их можно разделить на тра-

диционные (конвенциональные), (с размерами элементов от 100 мкм до 5 мкм), прецизионные (от 10 мкм до 0,5 мкм), ультрапрецизионные (до 0,001 мкм). Следующий диапазон для микро- и нанорезания приближается к предельным теоретическим значениям, ограничением которых являются размеры молекул или атомов вещества (0,2–0,3 нм).

Понятие микрообработка предполагает реализацию различных процессов разделения материала резанием или его модификации в микрометрическом диапазоне (от 1 мкм до 999 мкм), слишком малом для обработки традиционным резанием.

Нанообработка ориентирована на новейшие технологии, которые базируются на изменении структуры молекул или материалов в нанометрическом диапазоне.

В процессах микро- и нанообработки реальное удаление (съем) материала иногда ограничивается приповерхностным слоем, толщина которого может составлять всего лишь несколько атомов или атомных слоев.

Из этого следует, что нанорезание относится к диапазону точности, верхней границей которого является нижняя граница микрорезания, а нижней – параметры кристаллической решетки вещества. При этом измеряются в нанометрическом диапазоне параметры сечения срезаемого слоя, уровень качества поверхности (R_a до 5 нм) и учитываются размеры изделия (до 1 мкм). Все численные значения приведенных диапазонов являются достаточно условными, поэтому их необходимо воспринимать как ориентировочные.

1.4. Нанообъекты системы нанорезания и их размерный диапазон

В системах резания принципиально важным являются свойства обрабатываемых и инструментальных материалов, геометрические параметры режущего лезвия, радиус округления режущей кромки (ρ), параметры срезаемого слоя, технологическая среда.

От традиционной (конвенциональной) системы резания микро- и наносистемы отличаются тем, что основными их составляющими являются нанообъекты, размеры которых (или их элементов) принято измерять в нанометрах в пределах до 100 нм. Речь идет, прежде всего, о конструкционных и инструментальных наноматериалах (наноструктурированных, наноструктурных, нанокристаллических, нанофазных). Эти материалы обладают качест-

венно иными физическими, химическими, механическими, биологическими, функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Полному содержанию понятия наносистема резания соответствует такая, у которой все ее составляющие могут быть отнесены к нанообъектам:

- наноструктурированный обрабатываемый материал;
- наноструктурированный инструментальный материал;
- наноразмерные геометрические параметры режущего лезвия (например, ρ);
- нанометрические параметры срезаемого слоя (например, a_c);
- технологическая среда, в т. ч. и содержащая твердые наночастицы (например, алмаза).

Такую систему нанорезания можно рассматривать как **идеальную систему первого уровня** (рис. 1.2).

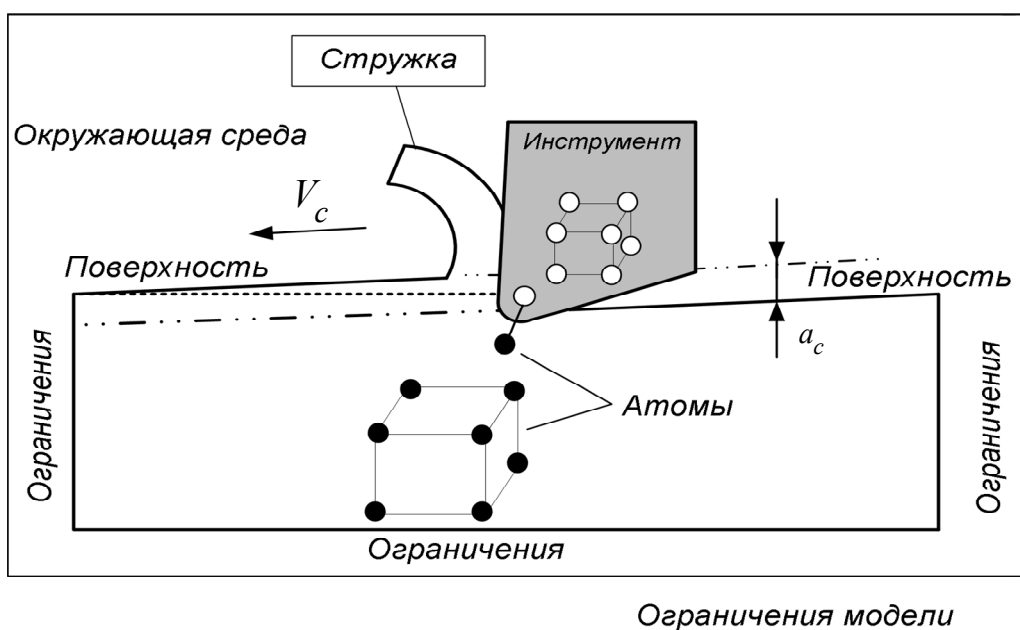


Рисунок 1.2 – Нанообъекты, взаимодействующие в системе нанорезания первого уровня

На практике такого сочетания нанообъектов в системе резания достигнуть достаточно сложно. В то же время значимыми могут являться и даже такие сочетания, когда в обычную систему резания входит хотя бы один или несколько нанообъектов.

Как **наносистемы резания второго уровня** можно рассматривать такие, которые содержат хоть и не полный, но все-таки преобладающий состав нанообъектов. Пример наносистемы второго уровня: наноструктурированный обрабатываемый и инструментальный материал, нанометрические параметры срезаемого слоя, нанометрический размер r , технологическая среда.

К наносистемам третьего уровня можно отнести такие, в составе которых нанообъекты присутствуют, но не преобладают. Пример наносистемы третьего уровня: только наноструктурированный обрабатываемый материал или СОТС с нанометрическими добавками; наноструктурированное покрытие на режущем инструменте; остальные объекты системы – традиционные.

Эти и другие понятия с приставкой «нано» позволяют идентифицировать нанообъект по геометрическому параметру (толщина пленки, размер кластера, диаметр нанотрубки и т. д.). Но эту приставку нужно воспринимать как обобщенное отражение объектов исследования, прогнозируемых явлений, эффектов и способов их описания, а не только как характеристику протяженности базового структурного элемента, не превышающую 100 нм.

Тем не менее, для наносистем резания принципиальное значение имеет именно размерный диапазон параметров нанообъектов и их составляющих, где наблюдаются новые явления и эффекты. Так, например, при резании инструментом из монокристалла алмаза радиус округления нанолезвия составляет от 2 до 45 нм, а толщина срезаемого слоя – до 1 нм, что при наличии высокого давления и соответствующей температуры обуславливает такие явления, как трансформация механизмов резания и др.

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Приставку «нано» используют в значении «относящийся к нанодиапазону» или «относящийся к нанотехнологиям» – от греческого *NANOS* – 1 нанометр равен 10^{-9} м.
2. Понятие о междисциплинарном характере нанонауки и нанотехнологии.
3. Элементарными объектами нанотехнологий являются атомы, молекулы, атомные кластеры и частицы, нанопорошки, нанослойные покрытия,

нанотрубки и фуллерены, квантовые ямы, проволоки, точки и др. Наночастицы не превышают 100 нм.

4. В зависимости от предельной точности процессы резания делятся на традиционные, прецизионные, ультрапрецизионные и микро- и нанорезание. Нанорезание относится к диапазону точности, верхней границей которого является нижняя граница микрорезания, а нижней – параметры кристаллической решетки вещества.

5. От традиционной системы резания микро- и наносистемы отличаются тем, что их составляющими являются нанообъекты, измеряемые в диапазоне до 100 нм.

6. Условно наносистемы разделяют на три уровня в зависимости от количества нанообъектов, составляющих систему нанорезания.

Хорошо спросить –

половина знания.

Из высказываний Мухаммеда

Тема 2

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ (НСМ)

План:

2.1. Атомно-молекулярные манипуляции.

2.2. Два подхода в получении наноструктурированных объектов.

2.3. Способы получения наноструктурированных материалов.

2.4. Принципы классификации наноструктурированных материалов.

2.5. Нанотехнологии в изготовлении режущих инструментов как нано-объектов системы резания.

Заключение.

2.1. Атомно-молекулярные манипуляции

Окружающий нас материальный мир состоит из миллионов комбинаций 91 атома, каждый из которых имеет свой электронный заряд (например, водород – +1, гелий – +2, литий – +3, уран – +92), свои размеры (от $\approx 0,1$ нм до $\approx 0,22$ нм), свою массу. Материалы, состоящие из 30 и более атомов, превышают один нм. Электроны отвечают за связи атомов, а, значит, за свойства атомов и молекул.

Занимающиеся проблемами создания и изучения свойств новых материалов в макрообъемах имеют дело с $10^{21} - 10^{25}$ атомами. Нанокристаллические, наноструктурированные материалы представляют собой одно- или многофазовые поликристаллы, произвольно (хаотично) ориентированные в пространстве и имеющие размеры, не превышающие 100 нм. При этом на межзеренные границы приходится до 50 % объема поликристалла. Можно говорить о двух структурных компонентах нанополукристалла: кристаллическую и межкристаллитную. Атомы межкристаллитной компоненты хаотично ориентированы в пределах межзеренных границ, что характерно для нанокристаллических материалов (рис. 2.1).

Атомно-молекулярные манипуляции с помощью зондовых сканирующих микроскопов позволяют конструировать те или иные изделия «по атому». Зонд микроскопа «захватывает» необходимый атом (например, примеси в кристаллической решетке), переносит его в заданную точку пространства или кристалла, «отпускает» его, тем самым устраняет дефект (рис. 2.2) или при повторных манипуляциях наслаивает слой за слоем.

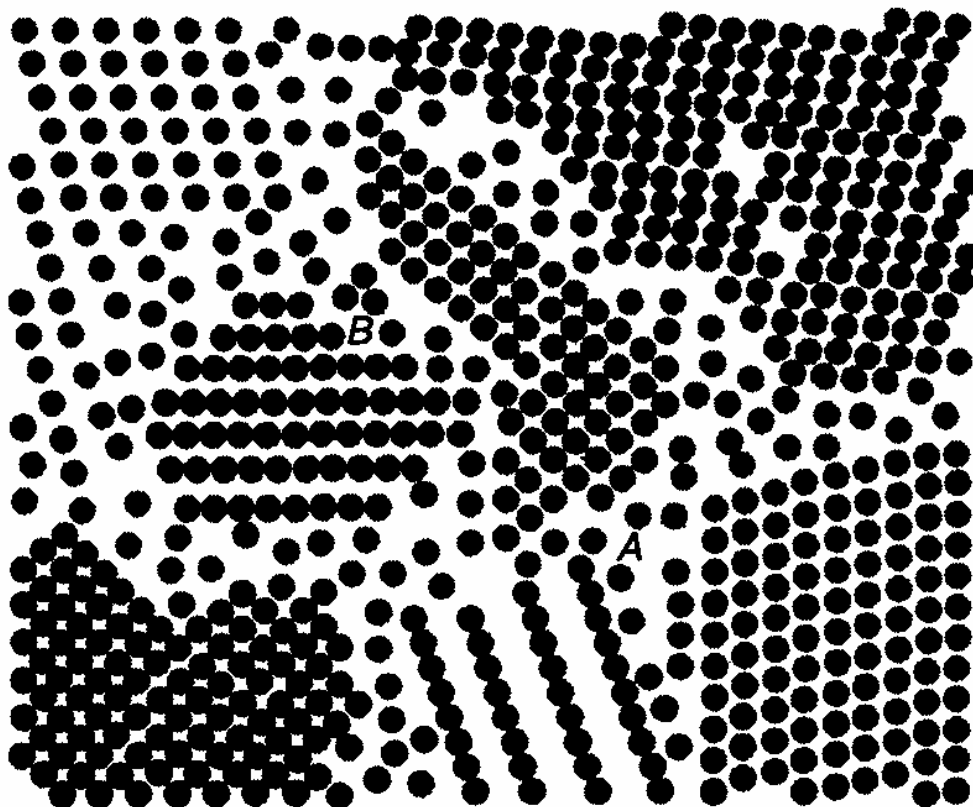
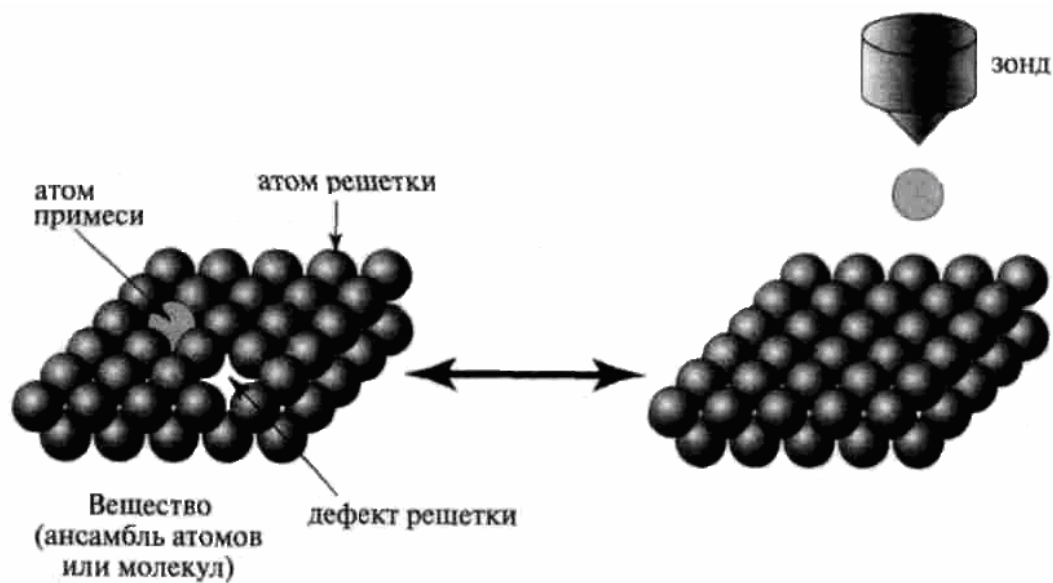


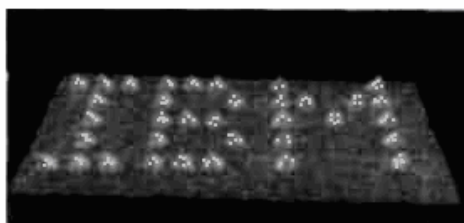
Рисунок 2.1 – Схематическое представление структуры нанокристаллического материала:

В – атомы кристаллитов; А – атомы межкристаллитных границ

Эти атомы (или их смеси) наращивают тот или иной объем заданного изделия любой конфигурации (рис. 2.3). Эти процессы называют атомной сборкой (в определенных случаях – самосборкой). Используя возможности атомно-молекулярной манипуляции, материаловеды стремятся получить твердые тела с новыми свойствами, химики – синтезировать более сложные молекулы, производство – улучшить качество изделий и т. д. Некоторые ученые это называют молекулярной нанотехнологией.

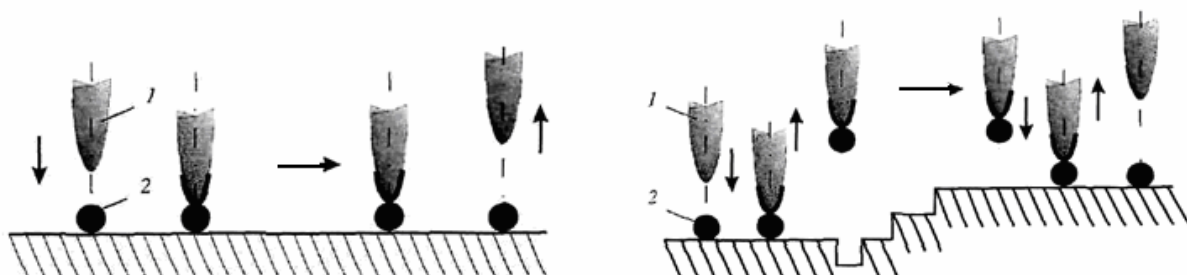


а



б

Рисунок 2.2 – Манипуляции на уровне атомов: *а* – манипуляции на атомарном уровне (использование зонда позволяет удалить атом примеси или «вставить» его на требуемое место); *б* – пример обработки вещества при помощи сканирующего туннельного микроскопа (на фотографии изображены самые маленькие буквы на свете – надпись из 35 атомов ксенона образует название фирмы IBM)



а

б

Рисунок 2.3 – Основные способы манипуляции атомами с помощью зонда СТМ: *а* – горизонтальный; *б* – вертикальный

2.2. Два подхода в получении наноструктурированных объектов

В природе и в производстве реализуются два подхода, называемых «от большего к меньшему» или «от меньшего к большему», а еще «сверху вниз» или «снизу вверх». Традиционным, легче воспринимаемым является нисходящий подход. Он основан чаще на традиционных способах уменьшения размеров физических тел (в промышленности – заготовок). Используются всевозможные способы размерной обработки, способные обеспечить получение наномерных изделий. Эти технологии миниатюризации являются высокозатратными, а потому малоэффективными. Большее распространение получила технология литографии – лазерной, электронной, рентгеновской. Но и она имеет различные ограничения, определенные возможностями технических средств.

Второй подход «от меньшего к большему» базируется на возможностях атомно-молекулярной манипуляции, появившихся с созданием зондовой сканирующей микроскопии. Контролируемым поэтапным наращиванием стало возможным «конструировать» нанообъекты без ограничений по сложности конструкции наноизделия.

Таким образом, «сырьем» для реализации второго подхода являются отдельные атомы, молекулы, системы атомов, кластеры, т. е. совершается переход от манипуляций веществом (из чего изготовлены заготовки) к манипуляциям атомами.

Зарождение, реализация и развитие новой парадигмы производства «снизу вверх», а не «сверху вниз», когда изделие получается отделением «лишнего» материала (затратная технология) от массивной заготовки, охватывает все жизненно важные виды деятельности человека – от освоения космоса до медицины, от национальной безопасности до экологии и сельского хозяйства.

2.3. Способы получения наноструктурированных материалов

2.3.1. Получение нанопорошков

Наноматериалы – обрабатываемые, инструментальные, покрытия – как нанообъекты системы резания получают различными способами, которые можно отнести к двум группам – способы диспергирования (дробления) и способы агрегатирования (соединения). Все они лежат в основе получения

наноструктурированных металлов, сплавов, порошков, полимеров, различных химических соединений, фуллерена, углеродных нанотрубок, компактных нанокристаллических материалов, нанокластеров, относящихся к нанообъектам системы нанорезания.

Все это может быть атомно-молекулярной основой получения конструкционных наноматериалов, обработка резанием которых рассматривается в этом пособии.

Получение нанопорошков отличается от методов получения традиционных порошков из-за высокой скорости образования центров зарождения частиц, малой скорости их роста, размеров не более 100 нм, узкого диапазона распределения по размерам, стабильности получения частиц заданного размера, достаточной воспроизводимости химического и физического состава, более высоких требований к контролю параметрами процесса получения (табл. 2.1).

К методам высокоэнергетического синтеза относят детонационный синтез, плазмохимический синтез. Эти технологии базируются на использовании реакций, протекающих с высокой скоростью в условиях, далеких от равновесия при высокоэнергетическом воздействии, например, ударной волны, сверхвысокочастотного разряда высокотемпературной плазмы с высокой скоростью взаимодействия.

К методам осаждения из растворов относят химическое осаждение, золь-гель процесс, метод жидкого восстановления из растворов, гидротермальный синтез, микроэмульсионный, криохимический.

Эти технологии базируются на химических реакциях в водных растворах солей, например, солей металлов, растворов алкоксидов, органических солей металлов, химических реакций гидротермального разложения и окисления в водных сферах при повышенных температурах (100–370 °С) и давлениях (до 100 МПа), растворении солей с последующим быстрым замораживанием, сублимацией растворителя и термическим разложением остатка.

К методам физического осаждения из паровой фазы относят методы термического испарения и взрывного испарения. Они базируются на процессах испарения вещества с помощью различных высокоинтенсивных источников энергии и последующего осаждения его из паровой фазы. Процессы протекают, как правило, в камерах (вакуумных или заполненных инертными газами (гелий, аргон, ксенон)). При испарении металла, он переходит в газовую фазу, его атомы стремятся к объединению в частицы порядка нескольких на-

нометров, которые осаждаются на охлажденную подложку. Метод взрывного испарения основан на выделении очень большого количества энергии за малый промежуток времени – взрыва. При этом материал испаряется, а затем за счет быстрого увеличения объема охлаждается с конденсацией паров в частицы малого размера (до 100 нм). Разряд тока создается с помощью конденсатора.

К методам механического размельчения относят метод размельчения с использованием мельниц, а также метод противоточного размола в псевдоожиженном слое. Измельчение материала до малых частиц происходит за счет интенсивного раздавливания между рабочими органами мельницы или столкновения друг с другом крупных фракций.

Таблица 2.1 – Основные из используемых в настоящее время методов получения нанопорошков



2.3.2. Получение наноматериалов

Основные методы получения наноматериалов представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Методы получения наноматериалов

Виды наноматериалов	Методы получения
1	2
Ультрадисперсные порошки (УДП)	1. Методы сборки частиц из отдельных атомов: <ul style="list-style-type: none">• физические методы испарения материала с последующей конденсацией его паров;• электрический взрыв проводников;• методы плазмохимического синтеза;• методы химического и электрохимического осаждения 2. Методы диспергирования материалов: <ul style="list-style-type: none">• механический размол в мельницах;• разложение нестабильных соединений;• компактирование ультрадисперсных порошков
Компактные нанокристаллические материалы	Осаждение УДП на подложку. Кристаллизация аморфных сплавов. Интенсивная пластическая деформация. Получение молекулярных кластеров путем химических реакций в растворе или газовой фазе
Нанокластеры, нанокластерные структуры	Получение кластеров при конденсации в газовой фазе путем первоначального испарения. Получение твердотельных кластеров в ходе твердотельных химических реакций или имплантации ионов. Получение коллоидных кластеров путем нуклеации из растворов и расплавов или путем золь-гель превращения
Фуллерены	Дуговой метод получения фуллеренов – «фуллереновая дуга». Пиролиз угля
Нанотрубки	Термическое распыление графитового электрода в плазме дугового разряда

Эти и другие способы получения наноматериалов (рис. 2.4, 2.5, 2.6, 2.7) обеспечивают достаточно широкий спектр их структуры.

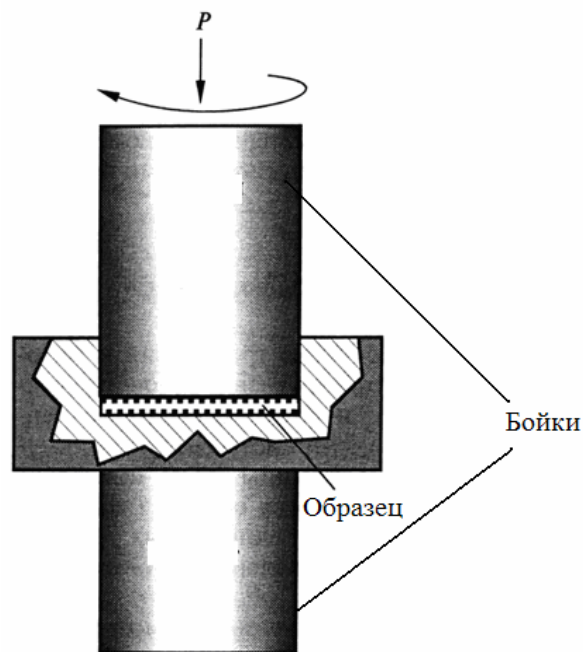


Рисунок 2.4 – Схема метода кручения под давлением

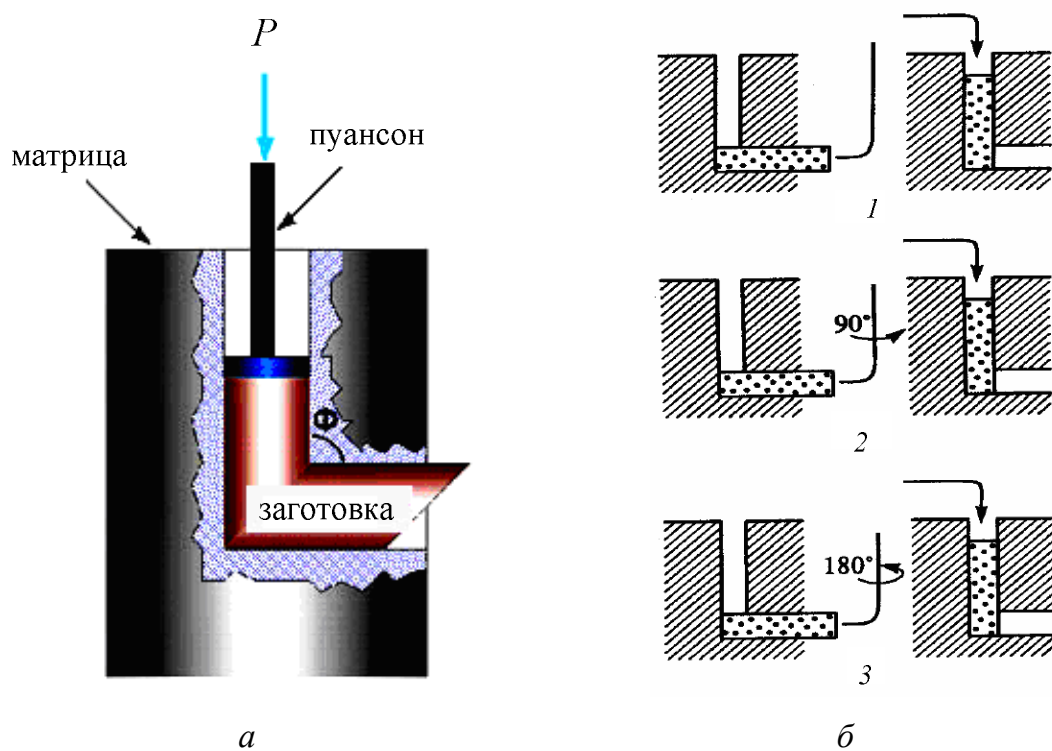


Рисунок 2.5 – Схема равноканального углового прессования (а) и возможные варианты равноканального углового прессования (б): 1 – неизменная ориентация заготовки; 2 – поворот заготовки на 90° , 3 – поворот заготовки на 180°

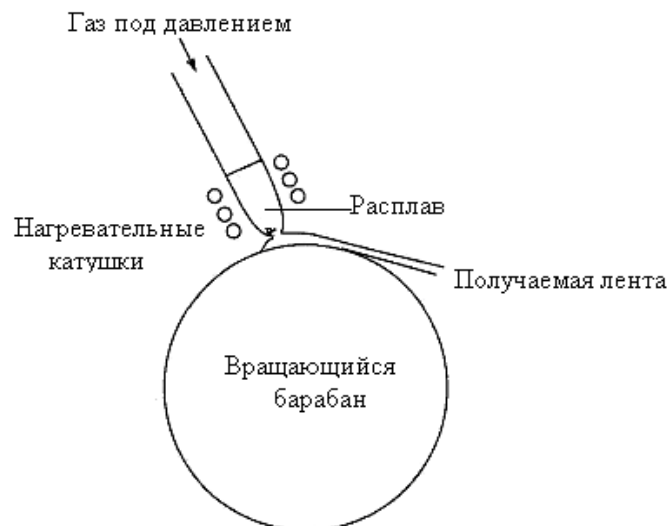


Рисунок 2.6 – Схема установки для получения наноструктурированного материала посредством быстрого охлаждения и отвердевания расплава на вращающемся барабане

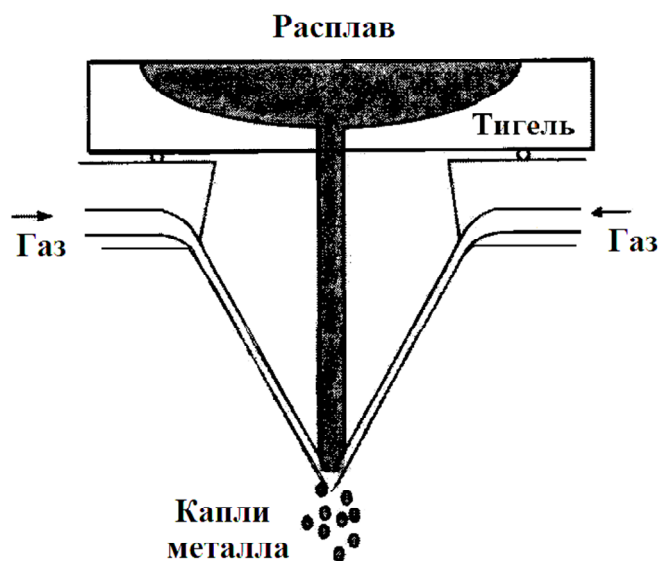


Рисунок 2.7– Схема установки для получения капель металлических наночастиц газовой атомизацией

Если для получения наноструктурированных материалов используются методы осаждения материалов из газовой среды, материал испаряется в атмосфере инертного газа (гелия или аргона) при давлении 130–1000 Па. В этом случае для испарения используются ионно-плазменные, электронно-лучевые, лазерные потоки энергии. Атомы инертного газа взаимодействуют с

атомами испаряемого материала, последние теряют свою кинетическую энергию и конденсируются в виде малых кристаллитов, осаждаемых на подложках.

2.4. Принципы классификации наноструктурированных материалов

Классификацию наноструктурированных материалов еще нельзя назвать устоявшейся. Тем не менее появилось несколько принципов этой важной проблемы, имеющей междисциплинарный характер.

Геометрический принцип важен постольку, поскольку геометрические параметры их структурных составляющих существенно влияют на особые свойства (табл. 2.3).

Физический принцип отдает преимущество «характерному» (предельному) структурному размеру, осуществляющему конкретное физическое свойство, например, для прочностных свойств – размер бездефектного кристалла, для электропроводности – длина свободного пробега электрона, для магнитных свойств – размер однодольного кристалла и т. д.

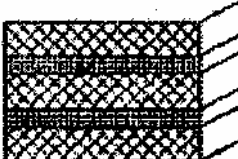
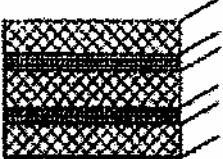
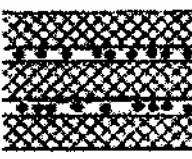
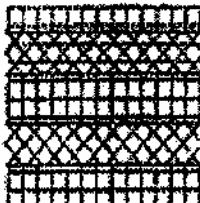
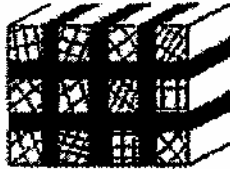

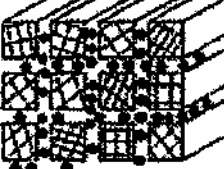

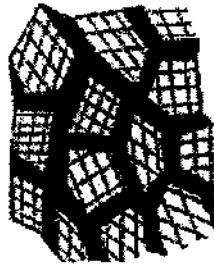

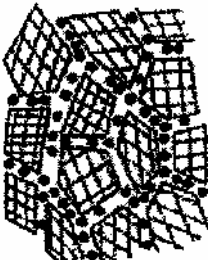
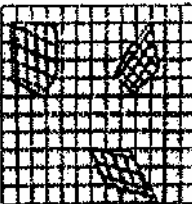
Таблица 2.3 – Классификация наноматериалов по геометрическому принципу

Характеристика объекта	Мерность материала по наноскопическим измерениям	Мерность материала по макроскопическим измерениям	Примеры материалов
Все три размера меньше 100 нм	3-мерный	0-мерный	Атомные кластеры и частицы, фуллерены, нанопорошки, квантовые точки
Два размера меньше 100 нм	2-мерный	1-мерный	Нанотрубки, нановолокна, квантовые проволоки
Один размер меньше 100 нм	1-мерный	2-мерный	Нанослойные покрытия, квантовые ямы
Все три размера более 100 нм	0-мерный	3-мерный	Нанокристаллические покрытия, объемные материалы с размерами зерна нанометрового диапазона, нанокомпозиты

По форме кристаллов НСМ делят на слоистые, волокнистые, равноосные, для которых элементы структуры являются нанообъектами (табл. 2.4).

По химическому составу – кристаллиты и межзеренные границы одинаковы по составу, различные по составу (многослойные), различные зерна по составу, когда компоненты распределены в матрице другого химического состава.

Таблица 2.4 – Классификация объемных наноматериалов по составу, распределению и форме структурных составляющих

Форма кристаллитов	Химический состав кристаллитов			
	Однофазный материал	Многофазный материал		
	Состав кристаллитов и границ раздела одинаковый	Состав кристаллитов различный	Состав кристаллитов и границ раздела различный	Кристаллиты диспергированы в матрице различного состава
Слоистая				
Волокнистая				
Равноосная				

По происхождению (нанобазису) различают следующие материалы:

- классические НСМ – наночастицы, нанотрубки, металлические, полупроводниковые, диэлектрические, нанокристаллиты и т. д.;

- синтетические – нанополимеры, нановолокна, тонкие пленки, нанокolloиды;

- наноразмерные биоструктуры, модифицированные вирусы, органические наноструктуры.

По топологии различают:

- непрерывные многослойные, нанопленки, нанотрубки, дискретные наночастицы, квантовые дыры, квантовые точки, наноразмерные точечные дефекты;

- комбинированные НСМ, периодичные многокомпонентные структуры, гетерогенные многообъектные сложные структуры.

2.5. Нанотехнологии в изготовлении режущих инструментов как нанообъектов системы резания

В табл. 2.5 и 2.6 приведены возможные варианты создания инструментов для наносистем резания путем использования тех или иных нанотехнологий.

Таблица 2.5 – Нанотехнологии в производстве лезвийных режущих инструментов как нанообъектов системы резания

№ п/п	Нанотехнологии	Нанообъект системы резания
1	Нанесение наноструктурированных покрытий	монокристаллический быстрорежущий инструмент; монокристаллический твердосплавный инструмент; сборный и составной твердосплавный инструмент
2	Наномодификация поверхностного слоя	монокристаллический быстрорежущий инструмент; монокристаллический твердосплавный инструмент; сборный и составной твердосплавный инструмент
3	Компактирование нанодисперсных порошков, производство инструмента из объемных наноструктурированных инструментальных материалов	композитный быстрорежущий инструмент из нанодисперсных порошков; монокристаллический твердосплавный инструмент; сборный и составной композитный из нанопорошка твердосплавный инструмент
4	Детонационные, плазмо-химические и др. технологии синтеза твердых и сверхтвердых материалов с наносвязками	монокристаллический твердосплавный инструмент; сборный и составной твердосплавный инструмент; лезвийный инструмент из сверхтвердых материалов

Таблица 2.6 – Нанотехнологии в производстве абразивных и алмазно-абразивных инструментов как нанообъектов системы резания

№ п/п	Нанотехнологии	Нанообъект системы резания
1	Производство из нанопорошков алмаза и др. сверхтвердых материалов алмазно-абразивного инструмента на синтетических связках	Алмазно-абразивный инструмент
2	Электрохимические технологии производства специальных абразивных нанопорошков	Абразивный инструмент со связанным абразивом
3	Детонационные, плазмохимические и др. технологии синтеза сверхтвердых материалов с наносвязками	Шлифовальные круги, в том числе отрезные и профильные на синтетических связках
4	Производство из нанопорошков сверхтвердых материалов инструментов на синтетических связках	Алмазно-абразивный инструмент на синтетических связках

Эти и другие нанотехнологии обеспечивают повышение прочности, твердости, теплопроводности, износостойкости режущих инструментов, увеличение скорости резания и производительности обработки, повышение точности и качества обработанной поверхности, а также экономии обрабатываемых материалов. Немаловажным является возможность минимизации и даже полного отказа от применения СОТС, в первую очередь, токсичных. Основу применяемых инструментальных материалов составляют тонкодисперсные твердые сплавы. Они подразделяются на группы в зависимости от размера твердых зерен: субмикронные (величина зерна карбидов 0,5–1,2 мкм), ультрадисперсные (0,2–0,5 мкм) и нанофазные (менее 0,2 мкм).

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Окружающий нас материальный мир сложен из миллионов комбинаций 91 атома, электронные заряды которых, размеры и масса определяют свойства этих веществ.

2. Зондовая сканирующая микроскопия создала возможности для манипуляции отдельными атомами в пространстве, поатомно наслаивать объемы до получения заданных объектов с атомной точностью.

3. Парадигма современного производства все больше базируется на реализации принципа «от малого–к большому» или «снизу–вверх». Основанное на этом принципе производство являет собой идеальный пример безотходного производства. Парадигма «от малого к большому» охватывает все виды деятельности человека – от космоса до медицины, от национальной безопасности до экологии и сельского хозяйства.

4. Все способы получения НСМ можно разделить на способы диспергирования (дробления) и способы агрегатирования (соединения). На их основе получают НСМ – металлы, сплавы, порошки, полимеры, фуллерены, углеродные трубки, нанокластеры и др., относящиеся к нанобъектам системы нанорезания.

5. В настоящее время нет общепринятой единой классификации наноструктурированных материалов. Сложность решения этой задачи состоит в том, что нанотехнология является междотраслевой областью знаний и производства. Вместе с тем можно выделить целый ряд принципов, по которым можно классифицировать НСМ: геометрический, физический, химический, топологический и др.

6. Важную роль играет использование нанотехнологий в изготовлении режущих инструментов. Это является одним из эффективных направлений обеспечения таких свойств инструментам, которые позволяют однозначно идентифицировать их как важнейшие нанобъекты системы нанорезания.

*Знание только тогда знание,
когда оно приобретено усилиями
своей мысли, а не памяти.*

Л. Толстой

Тема 3

СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

План:

3.1. Факторы, предопределяющие особые свойства наноматериалов.

3.2. Физико-механические свойства НСМ.

3.3. Устойчивость особых свойств НСМ.

Заключение.

3.1. Факторы, предопределяющие особые свойства наноматериалов

В реальных телах атомы и молекулы связаны друг с другом силами различной природы и величины – химических связей, межатомных и межмолекулярных, электростатических, электромагнитных. Реализация потенциала взаимодействия сложным образом зависит от их направленности и расстояния источников. Не взирая на большое число молекул взаимодействующих тел в пространстве, мгновенное поведение каждой элементарной частицы зависит от взаимодействия лишь с несколькими десятками ближайших частиц, а в случае с атомно-молекулярной манипуляцией – это отдельные (поименные) атомы и атомные связи

Такой нанообъект, как обрабатываемые наноматериалы в системе микро- и нанорезания играет особую роль. Уникальность их свойств во многом определяет особенности рабочего процесса их механической обработки. В свою очередь эти свойства зависят от целого ряда факторов.

К ним, прежде всего, относятся: нанометрические размеры кристаллитов, составляющих материал, и дискретный характер его атомно-молекулярной структуры. Одной из важных особенностей любой нанотехнологии является возможность манипулирования атомами и молекулами. При переходе к нанообъектам существенно возрастает роль атомов, формирующих поверхностный слой (примерно, 2–3 атомных слоя толщиной ≈ 1 нм).

Для наноматериалов с размером зерна в 6 нм доля поверхностных атомов больше, чем объемная доля кристаллов: с уменьшением зерна до 1...2 нм объемная доля межзеренного вещества увеличивается от 0,3 % до 90 %.

При равных массах в объектах с меньшими размерами зерен площадь межзеренных границ существенно возрастает, проявляются квантовые закономерности поведения, вследствие чего процессы самоупорядочения и самоорганизации начинают доминировать над искусственным упорядочением. Протекание разнообразных процессов в наносистемах может существенно ускоряться.

Размерный диапазон 0,1–100 нм, в котором идентифицируются нанобъекты как наночастицы, является своеобразной границей квантового и классического микромиров, что и определяет аномальный комплекс их физико-механических и химических свойств. Именно из-за проявления квантовых закономерностей свойства нанобъекта (упругие, демпфирующие, прочностные, тепловые, электрические, магнитные, диффузионные) могут сильно отличаться от свойств объемных макрообъектов из того же материала.

Причинами появления указанных свойств и особенностями их проявления в условиях наномира являются:

- изменение отношения вклада в различные процессы поверхностей частиц по отношению к объему при переходе к наноразмерным системам;
- энергетическая, полевая и «вещественная» неравновесность поверхности, охватывающая значительные объемы наночастиц;
- усиление роли различных видов размерных эффектов из-за значительной площади границ раздела в условиях наноконпозиций;
- проявление в условиях больших коллективов энергетически активных наночастиц нетрадиционных механизмов упорядочения, переноса энергии и заряда;
- малые характеристические размеры частиц и особый характер их упорядочения, обеспечивающие энергетическую и пространственную доступность транспорта заряда, энергии и конформационных изменений.

Принципиальной особенностью структурного состояния наноматериалов является существенное увеличение вклада поверхности на границах раздела (в сравнении с макроструктурой) в протекающие процессы, увеличение общей доли границ раздела и специфику их строения (наличие высокой плотности дефектов, коллективное поведение и взаимодействие зерен, соизмеримость размера наночастиц с «характерными размерами» различных физических нанопроцессов и проявление квантовых эффектов).

3.2. Физико-механические свойства конструкционных НСМ

Характеристики наноматериалов существенно отличаются от таковых для макрообъектов. Это, прежде всего, относится к: пределу прочности и текучести, твердости, ударной вязкости, усталостной прочности, коэффициентам теплоемкости и теплового расширения, износостойкости, демпфирующей способности, магнитным свойствам и т. д.

Если размеры наночастиц меньше критических, которые характеризуют многие физические явления, они могут обладать уникальными свойствами, не свойственными объемным телам из таких же веществ. Разные физические, химические, магнитные, оптические и др. свойства кластеров достигают значений, характерных для объемных материалов, при разных размерах кластера. Например, температура плавления золота нарастает по мере увеличения размера кластера и при 1000 атомов достигает значения, установленного для объемного золота. То же для меди происходит при размерах кластера около 100 атомов. Электропроводность, область прозрачности, магнетизм и некоторые другие свойства начинают зависеть от уменьшения размера частиц до 10–20 нм и менее.

Доля атомов, находящихся в приповерхностном слое (толщиной около 1 нм), растет с уменьшением размеров частиц вещества. Поэтому роль поверхностных атомов, обладающих свойствами, отличающимися от «внутренних», возрастает. В таких условиях вещество имеет:

- дискретную атомно-молекулярную структуру;
- множество поверхностей раздела;
- квантовые закономерности поведения;
- предпосылки к минимизации, снижению энергоемкости и материалоемкости;
- более высокий потенциал быстроедействия, протекания разнообразных процессов; особый характер протекания процессов, передачи энергии, заряда и конформационных изменений, отличающихся низким энергопотреблением, высокой скоростью и носящих признаки кооперативного синергетического процесса;
- в тонком приповерхностном слое большую долю поверхностных атомов;
- размеры кристаллитов составляют до нескольких нанометров;
- доминирование над процессом искусственного упорядочения явлений самоупорядочения и самоорганизации, отражающих проявление эффек-

тов матричного копирования и особенностей синтеза в условиях, далеких от равновесных.

Существенное повышение прочности наноматериалов связано с тем, что при уменьшении размеров зерен до наноуровня (0,1–100 нм), когда площадь межзеренных границ велика, они выступают как препятствия для движения дислокаций, которые скапливаясь, определяют этот эффект. Большая объемная плотность дефектов (дислокаций) в нанокристаллических материалах и нанокомпозитах повышает их прочность и другие механические свойства в 4...8 раз по сравнению с обычными крупнокристаллическими объектами (рис. 3.1, 3.2).

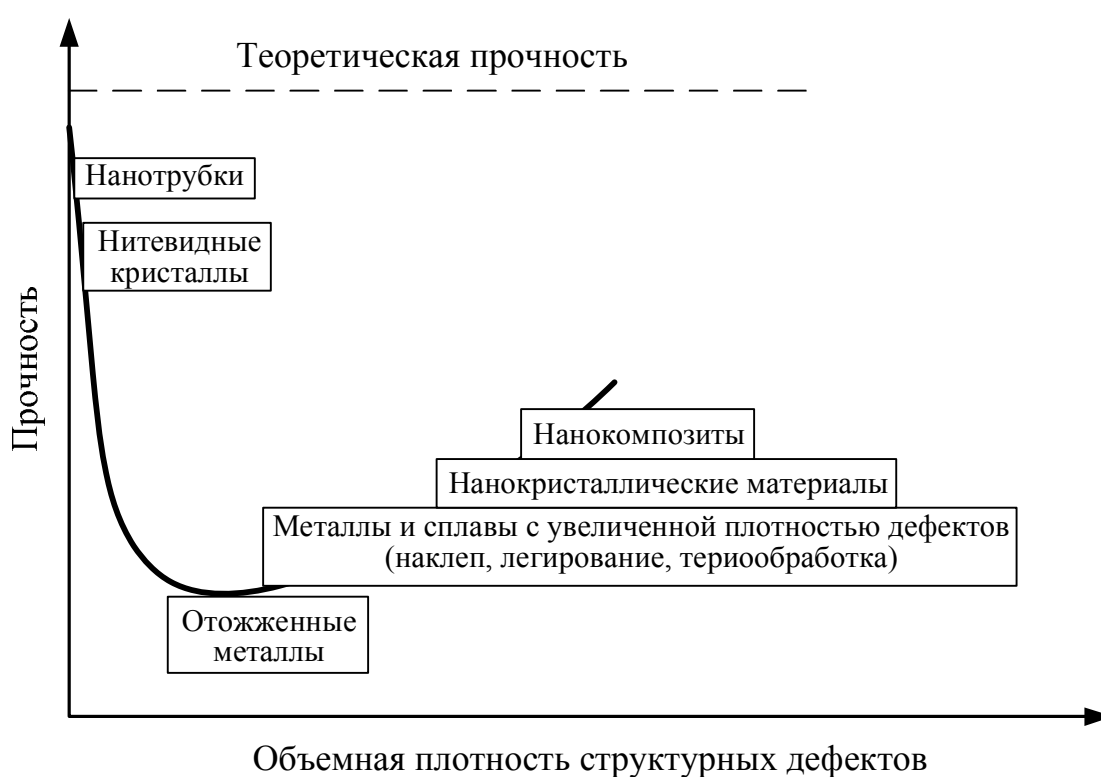


Рисунок 3.1 – Схематическая зависимость прочности от плотности атомарных дефектов в материале

Показательны усредненные характеристики механических свойств ряда материалов в крупно- и нанокристаллическом состоянии (табл. 3.1).

Существенно более высокая прочность пленок цветных металлов в нанометрическом диапазоне: никель (Ni) 2000 МПа, медь (Cu) – 1700 МПа, серебро (Ag) – 1200 МПа. Для сравнения: прочность легированных конструкци-

онных сталей: сталь 45 – 1200 МПа, сталь 65Г – 1600 МПа, сталь ШХ15 – 2000 МПа, углеродистая сталь – 400...450 МПа. Резко возрастает и твердость наноматериалов, полученных методом компактирования.

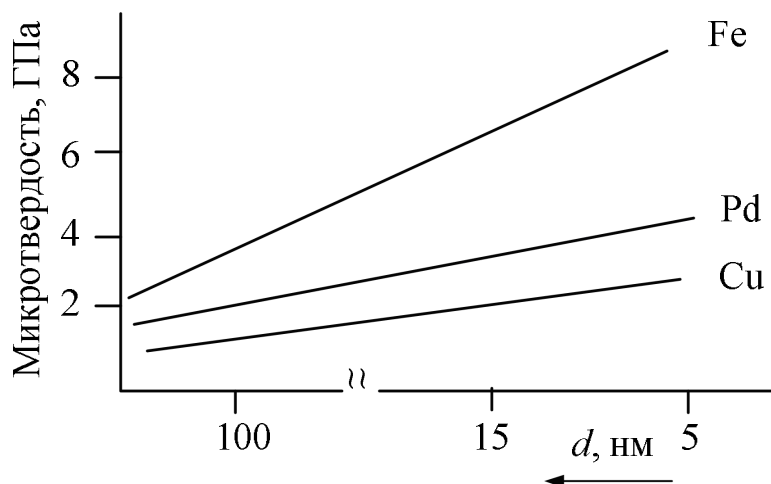


Рисунок 3.2 – Влияние размера зерна (d) на микротвердость металлов

Показательны усредненные характеристики механических свойств ряда материалов в нанокристаллическом состоянии (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Усредненные характеристики механических свойств объемных материалов в крупно- и нанокристаллическом состоянии

Материал		Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Микротвердость HV, МПа
Медь техническая М1	КК	200	60	600
	НК	850	350	1250
Титан технический ВТ1-0	КК	430	360	1700
	НК	1000	690	2500
Деформируемый титановый сплав ВТ6	КК	1050	980	3270
	НК	1500	1460	–
Сталь высоколегированная коррозионно-стойкая 12Х18Н10Т	КК	550	240	2000
	НК	–	1340	–

КК – крупнокристаллический, НК – нанокристаллический

С помощью наноматериалов разрешается одно из противоречий обычных материалов – положение, в соответствии с которым увеличение прочности ведет к снижению пластичности. *Присущая наноматериалам высокая прочность сочетается с достаточно высокой пластичностью и даже сверхпластичностью.*

Чрезвычайно широк диапазон возможных изменений электрических свойств от диэлектрических до сверхпроводимости.

Таким образом, *уникальные свойства конструкционных наноматериалов как обрабатываемых предъявляют новые повышенные требования к инструментальным материалам, прежде всего к уровню их твердости, прочности, износостойкости.*

3.3. Устойчивость особых свойств НСМ

Устойчивость особых свойств наноструктурированных материалов привлекает все большее внимание исследователей. Есть немало публикаций, в которых указывается на то, что нанокристаллические структуры чистых металлов неустойчивы. Даже при комнатной температуре происходит рост зерна. В результате материал теряет свои нанокристаллические свойства. Показано, что, например, ферромагнетизм исчезает при размерах частиц железа, никеля около 6–7 нм, при дальнейшем уменьшении зерен частицы становятся парамагнитными. Частицы размером 6 нм переходят в ферромагнитное состояние только при $T_0 = 170$ К, тогда как массивные образцы железа имеют температуру Кюри (температура, при которой полностью разрушается упорядоченность ориентации магнитных моментов доменов) 1090 К.

Основным фактором, влияющим на изменение нанокристаллических свойств материалов, является температура, течение пластической деформации, остаточные напряжения, а непосредственное влияние на рост размера зерен оказывает уровень температуры и длительность ее воздействия на материал.

Таким образом, *характеризовать уникальные физико-механические свойства наноструктурированных материалов необходимо с учетом того факта, что в рассматриваемом диапазоне температур, напряжений и других условий истинные значения могут существенно отличаться от зафиксированных в других условиях.*

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. При переходе к нанообъектам существенно возрастает роль атомов, формирующих поверхностный слой, растут объемы и доля межзеренного вещества, проявляются квантовые закономерности поведения атомов, начинают доминировать процессы самоупорядочения и самоорганизации, ускоряется протекание процессов.

2. Размерный диапазон 0,1–100 нм является своеобразной границей квантового и классического микромиров, что и определяет аномальный комплекс их физико-механических свойств. По этой причине свойства нанообъектов (упругие, демпфирующие, прочностные, тепловые, электрические, магнитные, диффузионные и т. д.) могут сильно отличаться от свойств объемных материалов.

3. Присущая наноматериалам высокая прочность сочетается с достаточно высокой пластичностью и даже сверхпластичностью, а электропроводность изменяется от свойств диэлектрических до сверхпроводимости.

4. Энергетическая, полевая, «вещественная» неравновесность поверхности, охватывающая значительные объемы наночастиц, приводит к тому, что многие наноэффекты и свойства оказываются неустойчивыми и могут изменяться до полной нигиляции.

5. Уникальные свойства конструкционных наноматериалов как nanoобработываемых и как нанообъектов системы нанорезания предъявляют новые повышенные требования к инструментальным материалам, прежде всего к уровню их твердости, прочности, износостойкости, теплопроводности.

Истинные знания состоят не в знакомстве с фактами, которые делают человека лишь педантом, а в использовании фактов, которые делают его философом.

Г. Бокль

Тема 4

СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОПОКРЫТИЙ

План:

4.1. Потенциал наноструктурированных инструментальных материалов и покрытий.

4.2. Режущий инструмент как нанообъект системы нанорезания.

4.3. Функциональная роль нанослойных покрытий на режущем инструменте.

4.4. Свойства нанопокровтий и инструментальных наноматериалов.

Заключение.

4.1. Потенциал наноструктурированных инструментальных материалов и покрытий

Режущие инструменты, несмотря на уже достигнутые в последние десятилетия успехи, еще остаются одним из самых слабых звеньев технологических систем резания. *Важнейшей предпосылкой реализации процессов микро- и нанорезания является потенциал наноструктурированных инструментальных материалов и покрытий на режущей части лезвийных инструментов, на порошках из инструментальных сверхтвердых и абразивных материалов.*

Для эффективности работы технологической системы резания, существенного повышения производительности и качества обработки усилия ученых, работающих в инструментальной отрасли, сосредотачиваются на работах по созданию новых наноструктурированных инструментальных материалов, совершенствовании технологий нанесения нанопокровтий на рабочие поверхности инструмента и модификации его поверхностного слоя, а также на

создании наноразмерных процессов обработки и новых технологий изготовления современных конструкций режущих инструментов.

В прикладном плане задача получения наноструктурированных инструментальных материалов решается по нескольким направлениям, из которых следует выделить:

- создание порошковых быстрорежущих сталей с наноразмерными карбидными фазами;
- производство наноразмерных зерен карбидов, нитридов и др. соединений для последующего спекания твердых сплавов;
- разработка новых технологий спекания наноструктурных твердых сплавов;
- создание наноструктурных материалов инструментального назначения: алмазов, сверхтвердых нитридов бора и др.;
- получение нанопорошков из конвенциональных абразивных материалов;
- производство связок с нанодобавками для абразивных и алмазно-абразивных инструментов.

Эффективность наноструктурирования убедительно иллюстрируется на примере сверхтвердых материалов, отличающихся плотной упаковкой атомов. Сравнение свойств природного алмаза со свойствами наноструктурированных синтетических алмазов и поликристаллов КНБ показывает, что характеристики последних достигают значений, свойственных природному, а по теплопроводности и теплостойкости превосходят таковые. Табл. 4.1 подтверждает это и для твердых сплавов.

Таблица 4.1 – Влияние размеров зерен карбидов вольфрама на твердость

Размер зерна WC (мкм)	WC	Co	TaC	Плотность (г/см ³)	Твердость (HRA)
мелкое зерно WC 0,5 мкм	94,2	5,8	0,2	14,92	93,4
крупное зерно WC 6 мкм	94,0	6,0		14,95	88,5

4.2. Режущий инструмент как нанообъект системы нанорезания

Режущий инструмент и в традиционных (конвекциональных) системах резания играет важнейшую роль. Он является наиболее революционирующим объектом традиционных и наносистем резания.

В историческом плане каждое появление нового инструментального материала приводит к заметным улучшениям технологических процессов, к повышению производительности и качества обработки. Известное выражение о том, что дивиденды фирмы находятся на режущей кромке резца, отражает эту объективную истину. Достаточно вспомнить те новые рубежи, которые достигались при появлении легированных сталей, твердых сплавов, керамики, керметов, алмазов и сверхтвердых нитридов бора.

Современные системы нанорезания предъявляют к инструменту чрезвычайно высокие требования. Это относится и собственно к инструментальному материалу, и к возможности формировать и надежно поддерживать длительное время остроту режущего лезвия, способного при малом p снимать сверхтонкие стружки, т. е. сверхмалых толщинах среза. Как нанообъект системы нанорезания режущий инструмент является наиболее ответственным нанообъектом.

4.3. Функциональная роль нанослойных покрытий на режущем инструменте

Функциональная роль покрытий на инструменты многолика. Покрытие представляется промежуточной технологической средой между инструментальным и обрабатываемым материалом, которая способна повысить базовые свойства инструментальных материалов – твердость, прочность, теплостойкость, износостойкость, физико-химическую пассивность по отношению к обрабатываемому материалу (табл. 4.2). В тоже время, покрытие позволяет технологу влиять на протекание контактных процессов резания, на режимы обработки, геометрические параметры срезаемого слоя и тем самым снижать трение на контактных поверхностях, снижать мощность тепловых источников, повышать температурный порог адгезионной и диффузионной активности, выступая своеобразным барьером между обрабатываемым и инструментальными материалами. Эту роль могут выполнять многослойно-композиционные наноструктурированные функциональные покрытия (табл. 4.3).

Таблица 4.2 – Прочность металлических нанослойных покрытий (тонких пленок) по сравнению с массивными крупнокристаллическими аналогами и сталью

Материал		Прочность σ_B , МПа	Марка стали (крупнокристаллическое состояние)	Прочность стали после термообработки (закалка + отпуск) σ_B , МПа
Никель	КК	450	Сталь 45	980
	НП	2000		
Медь	КК	200	Сталь 65Г	1670
	НП	1700		
Серебро	КК	140	Сталь ШХ15	2350
	НП	1200		

КК – массивное крупнокристаллическое состояние; НП – нанослойное покрытие

Таблица 4.3 – Твердость некоторых нанопокровтий

Состав пленки	Метод изготовления пленки	Толщина пленки, мкм	Размер зерна, нм	Твердость Н, ГПа
TiN	Магнетронное напыление	1–2	5–30	35–50
TiB ₂	Магнетронное напыление	1–4	2–8	50–70
Ti (B, N, C) _x	Магнетронное напыление	5–2	1–5	60–70
TiN–SiNVTiSh	Плазма CVD	3,5	3,0	100
TiNWN	Магнетронное напыление	2,5	2,5	54
TiN/NbN	Дуговое напыление	2	10	78
TiN/ZrN	Дуговое напыление	2	10	70

4.4. Свойства нанопокровтий и инструментальных наноматериалов

Различают три группы таких покрытий:

- состоящие из слоев с одинаковыми химическими связями и структурой;
- содержащие слои с сильно отличающимися химическими связями и структурами;
- имеющие слои с внутренними граничными промежуточными подслоями нанометрической толщины.

Покрyтия с нанозернистой структурой обладают высокой твердостью и износостойкостью в сочетании с достаточной трещиностойкостью и сопротивляемостью усталостному разрушению. В настоящее время реализуется переход от однокомпонентных покрyтий (TiC, TiN, TiCN) к многокомпонентным композиционным покрyтиям на основе двойных и тройных соединений нитридов (Ti, Al)N, (Ti, Zr)N, (TiNb)N, (Ti, Mo)N, (Ti, Al, V)N, (Ti, Zr, C)N. Высок потенциал градиентных покрyтий, например, Ti Al CN-G, структура которых плавно изменяется от основы (субстрата) к наружной поверхности.

Все типы покрyтий, имеющие зерна размером менее 100 нм, относят к наноструктурированным.

Традиционные достаточно твердые и хрупкие износостойкие покрyтия для режущих инструментов уже на стадии приработки накапливают повреждения и вследствие этих необратимых процессов катастрофически разрушаются. У наноструктурных покрyтий трение и износ охватывают глубины приповерхностных слоев, не превышающих десятков ангстрем, что минимизирует накопления повреждений в инструменте. Это связано с особенностями физико-химического взаимодействия обрабатываемого материала с наноструктурными покрyтиями. При рациональном выборе материалов трение активизирует процессы локальной пластической деформации, фазовые превращения, диффузию и химические реакции на границе раздела контактирующих тел, которые целенаправленно развиваются. В зоне контакта динамически возникают и разрушаются трибопленки, которые выполняют экранирующую роль, нивелируя адгезионное схватывание, выступая в роли теплового барьера и, по сути, являются смазками. Эти процессы являются каналами диссипации работы трения и обеспечивают обратную связь, регулируя каждую стадию износа.

Перспективными являются адаптирующиеся неламинатные и многослойные покрyтия на основе простых и сложных нитридов для высокоскоростного резания без применения смазочно-охлаждающих жидкостей.

Эффективны также и нанокомпозитные структуры, представляющие собой нанокристаллические зерна материала покрyтия, внедренные в аморфную матрицу.

Разработка, создание и реализация широкомасштабных, высокотехнологических методов получения наноструктурированных инструментальных

материалов и покрытий различного назначения считается одной из наиболее сложных ключевых задач, стоящих перед наукой. Ее решение необходимо для технологического использования в производствах нового поколения.

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. В наносистеме нанорезания режущий инструмент как нанообъект системы играет важнейшую роль, т. к. от его качества зависит реализация потенциала всей наносистемы резания.

2. Задача получения наноструктурированных материалов решается по таким направлениям, как создание быстрорежущих сталей с наноразмерными карбидными фазами; производство наноразмерных карбидов, нитридов и др. соединений для последующего спекания твердых сплавов; создание наноструктурных материалов инструментального назначения, производство нанопорошков из абразивных материалов, в том числе алмазов и сверхтвердых нитридов бора.

Нанопокрывтия на инструменте выполняют многофункциональную роль, т. к. позволяют существенно влиять на функционирование всей системы нанорезания через влияние нового уровня твердости, прочности, теплоустойчивости, износостойкости, снижение физико-химической активности. Такова функциональная роль многослойно-композиционных покрытий.

*Со знанием должно быть
обязательно связано учение.
А. Дистервет*

Тема 5

УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА НАНОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

План:

- 5.1. Роль нанообъектов системы нанорезания.
- 5.2. Концепция взаимодействия энергетических полей нанообъектов системы нанорезания.
- 5.3. Преобразование свойств материалов в процессе нанорезания.
- 5.4. Роль высокого давления.
- Заключение.

5.1. Роль нанообъектов системы нанорезания

Реализация процесса резания в размерном нанодиапазоне обеспечивается чрезвычайно высокой прецизионностью и жесткостью станков, инструмента, высокой точностью относительных перемещений в системе, управлением и измерениями. *В связи с чрезвычайно малым масштабом обработки нанорезанием предложено выделять однолезвийное (одноточечное – точение и строгание) и многолезвийное (многоточечное – фрезерование, сверление, протягивание) нанорезание.*

Независимо от принятого подразделения система нанорезания должна располагать чрезвычайно острыми, например, алмазными режущими инструментами, шпинделями на воздушных подушках, пневматическими и гидравлическими направляющими, высоким разрешением регулирования точности подачи, нейтрализацией вибраций, контролем температуры и т. п.

В качестве примера можно рассмотреть токарный станок, используемый для алмазного точения. Станок устанавливается на высококачественном гранитном основании с точной поверхностью. Гранитное основание помещено на пневмоподвеску на специальном твердом фундаменте, который обеспечивает строго горизонтальное положение рабочей поверхности. Столы станка могут перемещаться с высокой степенью точности благодаря аэраста-

тическим и гидравлическим подвескам с высокой жесткостью. Перемещающиеся элементы станка приводятся в действие серводвигателями посредством гидростатических винтов или напрямую посредством линейных двигателей. Эти движения измеряются и контролируются сенсорами перемещения с чрезвычайно высокой разрешающей способностью (например, лазерные голографические весы). Заготовка закреплена в вакуумном патроне после точного центрирования и вращается с высокой скоростью за счет применения шпинделя на аэростатических или гидростатических подшипниках. Новейшие ультрапрецизионные станки имеют четырех или пятикоординатное числовое программное управление с разрешающей способностью менее одного нанометра за один шаг.

Особую роль в обеспечении микро- и нанорезания играет наноразмерная обработка режущих и переходных лезвий обрабатывающего инструмента (как правило, составного с неразъемным соединением режущей части) и наноразмерная настройка его режущих кромок (прецизионных инструментов). Все это обеспечивает, в конечном счете, повышение точности размеров и формы изделия, качества обработки поверхностей конструктивно сложных деталей точного машино- и приборостроения. Как важнейший нанообъект системы резания инструмент и его конструктивные элементы должны соответствовать требованиям, диктуемым физической сущностью процессов, происходящих в системе нанорезания.

Основой современных достижений в металлообработке является познание физической сущности процессов, протекающих в зоне резания. *Переключение внимания исследователей на изучение объектов, явлений и эффектов в нанодиапазоне взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемого материала открывает новые возможности познания этого уникального по сути и сложного по структуре процесса и создания на этой основе фундамента для выявления путей и средств коренного повышения производительности, качества и высокой экономичности микро- и нанотехнологий изготовления сложных изделий.*

5.2. Концепция взаимодействия энергетических полей нанообъектов системы нанорезания

Изучая традиционные процессы резания, исходили из представлений о непосредственном контактном взаимодействии двух твердых тел – инструмента и заготовки. *При переходе в нанодиапазон можно представить этот*

механизм как контактное взаимодействие и взаимовлияние полей инструмента и заготовки, распределенных в пространстве в условиях окружающей среды (третьего тела), подобно взаимодействию между отдельными частицами или системами элементарных частиц на атомно-молекулярном уровне. В этом случае все материалы и вещества рассматриваются как квазикомпозиционные материалы, в которых связующим (матрицей) являются поля энергетического взаимодействия (энергетические зоны составляющих атомов, молекул, кристаллов), а арматурой (наполнителем) – соответствующие элементарные частицы. Тогда процесс нанорезания представляет собой взаимодействие энергетических полей на стыке материалов инструмента и заготовки, а результат обработки – результат взаимодействия полей – электромагнитного, слабого, сильного (ядерного) и гравитационного.

Концепция взаимодействия полей дополняет традиционные методы изучения и совершенствования процессов резания. Сущность процесса резания в этом представлении такова.

Внешнее механическое воздействие поля инструмента на поле заготовки вызывает соответствующие проявления механических свойств взаимодействующих тел. Прежде всего, в контактирующих телах возникают объемные поля напряжений как результат действия внутренних удельных сил между смежными частицами материалов. Этим напряжениям соответствуют возникшие поля деформаций.

На уровне атомов и ионов, образующих структуру материалов, это приводит к их смещению относительно равновесных положений, установившихся до этого. При этом происходит упругая деформация локальных полей взаимодействующих между собой атомов и ионов тел. При увеличении напряжений происходит разрушение сложившихся атомно-молекулярных связей, перестройка структуры материалов и образование новых связей, которые обеспечивают новое равновесное состояние материала, претерпевшего изменения. В особой мере это относится к приповерхностным атомным слоям (рис. 9.1).

Взаимодействие механических полей сопровождается взаимодействием полей температурных, объемными физическими, химическими, диффузионными процессами и множеством других явлений, одновременное протекание которых обеспечивает градиент перестройки структуры материала, его послойную и зеренную дефрагментацию и разрушение, в итоге – образование новых атомно-молекулярных связей.

5.3. Преобразование свойств материалов в процессе нанорезания

Сущность процесса преобразования свойств материала при нанорезании, как и во всех других известных технологических методах обработки, заключается в нарушении его текущего равновесного состояния. Физико-химические процессы, провоцируемые подводимой энергией, стремятся поддерживать равновесное состояние материала в новых энергетических условиях: старые межатомные связи разрушаются и образуются новые. После восстановления первоначальных параметров окружающей среды (температура, давление) структура и свойства материала, претерпевшего дополнительное энергетическое воздействие, будут отличаться от исходных.

Следовательно, с энергетической точки зрения нанорезание материалов относится к локализованным высокоэнергетическим технологиям, которые сопровождаются большим числом сложных взаимосвязанных и взаимообусловленных физико-химических процессов и явлений. Большая мощность электродвигателя станка передается на малый по размерам контактный участок обрабатываемой заготовки и режущего инструмента. Приложенная извне механическая энергия локализуется в зоне контакта инструмента, стружки и заготовки в местах протекания процессов деформации и разрушения (износа) и преобразуется в другие виды энергии.

По своим энергетическим характеристикам процесс резания на микроуровне эквивалентен взрыву. Динамические параметры процесса резания не только не уступают взрыву взрывчатых веществ, но могут существенно превосходить их. В зонах выделения и локализации энергии при непрерывном процессе резания происходит взрывное преобразование микроструктуры и свойств материала, а средой (прослойкой) между обрабатываемым материалом и инструментом является пространство с характеристиками взрыва.

Особенностью «взрыва» при нанорезании является то, что он происходит в среде твердого тела, подверженного воздействию внешней механической энергии, передаваемой заготовке рабочим инструментом. Существуют области, в которых в силу их расположения по отношению к зонам выделения тепла слои материала микроскопической толщины претерпевают переход в необычное состояние сверхтекучести. В результате этот материал подобно расплаву обволакивает вершину режущего лезвия, растекается вдоль поверхности контакта. Условия возникновения явления сверхтекучести в среде твердого тела сопоставимы с условиями, вызывающими взрыв при резании (рис. 5.1).

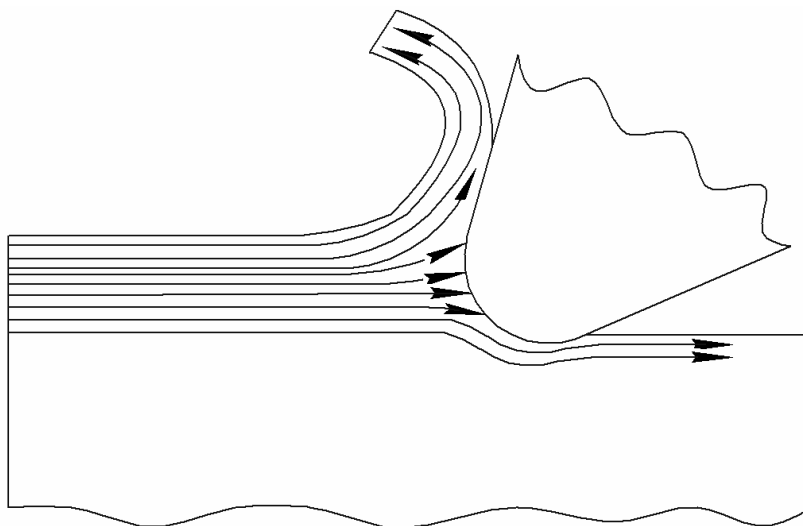


Рисунок 5.1 – Перестройка структуры материала при нанорезании

5.4. Роль высокого давления

Явление сверхтекучести и обтекания вершины режущего клина необходимо рассматривать из условий всестороннего (гидростатического) сжатия. Здесь выскажем предположение о том, что явление сверхтекучести, обтекание кромки лезвия режущего инструмента, по-видимому, является следствием действия и температурного фактора, и гидростатического давления одновременно.

Воздействие на материал высокого давления (более 0,1 ГПа) одновременно с высокими температурами вызывает значительные изменения его структуры и свойств: происходит увеличение плотности вещества, ускоряется достижение равновесного энергетически более выгодного состояния, изменяются свойства веществ, связанные с явлениями на атомно-молекулярном уровне: твердость, прочность, электропроводность, теплопроводность, магнитное и электрическое сопротивление и др.

Подчеркнем, что условия нагружения материала при нанорезании существенно отличаются от только статического или динамического всестороннего сжатия высоким давлением в экспериментальных исследованиях. При резании имеют место разрушение через взрыв, термопластический сдвиг, кручение, металлургические процессы, наростообразование, износ и др. В системе резания возникают термоэлектрические токи, термоэлектронная эмиссия, термомагнитные и электромагнитные эффекты, выделение и поглощение тепла экзоэлектронной эмиссии. Все это концентрируется

(локализуется) в нанобъемах материалов, прилегающим к контактными поверхностям.

В зонах интенсивной деформации наблюдается кручение элементарных объемов материала вокруг своей оси в направлении сдвига со скоростями до 105–106 рад/с и, как следствие, возбуждение магнитно-механических явлений.

Разные по своей физической природе процессы и явления вызывают поля механической, электромагнитной и др. природы, обладающие информацией о физико-механических условиях в зоне стружкообразования, регистрация которой даст возможность использовать их для активного контроля процесса резания, диагностики его и оптимизации (методы диагностики по акустической эмиссии, электромагнитным и экзoeлектронным колебаниям и др.).

Изложенное позволяет констатировать, *что познание на наноуровне механизмов преобразования свойств материалов в процессе резания дает возможность целенаправленно управлять воздействием на материалы заготовок с целью достижения новых высоких показателей производительности, качества и экономичности обработки.*

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Процесс нанорезания реализуется в сложных условиях. Для эффективности процесса необходимо, чтобы все нанобъекты системы нанорезания отвечали требованиям, предъявляемым к каждому из них – станку, инструменту, управлению точностью взаимных перемещений независимо от того, идет ли речь об однолезвийном резании или многолезвийном. Как правило, все нанобъекты системы нанорезания должны обладать предельными (граничными) характеристиками: инструмент – из природного алмаза; шпиндели – на воздушных подушках; направляющие – пневматические и гидравлические; регистрирующая аппаратура – с высоким разрешением и т. д. Например, температура отрицательно влияет на устойчивость наноструктуры, поэтому здесь нужен надежный контроль ее значений, чтобы режимы резания не вышли за допустимые пределы.

2. Изучение поведения нанобъектов, новых явлений и эффектов в нанодиапазоне формирует предпосылки для создания фундамента и выбора на-

правлений и средств достижения принципиально нового уровня производительности, качества и экономичности производства.

3. Концепция взаимодействия полей нанообъектов дополняет традиционные методы изучения и совершенствования процессов нанорезания. Сам процесс рассматривается как взаимодействие энергетических полей в контакте материалов обрабатываемого и инструментального, а результат обработки – результат взаимодействия полей – силового, электромагнитного, слабого и сильного гравитационного.

С энергетической точки зрения нанорезание относится к локализованным высокоэнергетическим технологиям, которые сопровождаются большим числом сложных взаимосвязанных процессов и явлений; по своим энергетическим характеристикам нанорезание эквивалентно взрыву.

4. В зонах выделения и локализации энергии при непрерывном процессе происходит взрывное преобразование микроструктуры и свойств материала, в том числе появление сверхтекучести. Подобно расплаву материал обволакивает вершину режущего лезвия и растекается вдоль поверхности контакта.

5. Воздействие на материал высокого гидростатического давления в пределах пространства полей параллельно с температурами вызывает значительное изменение его структуры и свойств, связанных с явлениями на атомно-молекулярном уровне: твердость, прочность, электропроводность, теплопроводность, магнитное и электрическое сопротивление и т. п.

6. Управляемое преобразование свойств на наноуровне указывает на серьезный потенциал нанорезания для достижения на атомно-молекулярном уровне новых рубежей технологии изготовления.

*Вглядись в явление – и увидишь,
что оно есть шелуха другого,
глубже лежащего.*

П. Флоренский

Тема 6

ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИИ В СИСТЕМАХ НАНОРЕЗАНИЯ

План:

6.1. Сущность перехода от хрупкого к пластическому механизму разрушения материала.

6.2. Роль гидростатического давления при реализации пластического режима стружкообразования.

6.3. Влияние толщины срезаемого слоя и величин радиуса округления режущей кромки на режим стружкообразования.

6.4. Влияние режима стружкообразования на качество обработанной поверхности.

Заключение.

6.1. Сущность перехода от хрупкого к пластическому механизму разрушения материала

Одной из принципиальных отличительных особенностей процессов микро- и нанорезания является трансформация механизмов разрушения при стружкообразовании, возможная при определенных условиях. Это означает, что хрупкие материалы в системах нанорезания могут вести себя как пластичные, образуя соответственно этому стружки типа сливной или сус-тавчатой вместо образующейся даже при микрорезании этого материала стружки надлома. Для этого в зоне резания в окрестности вершины режущего клина должны быть созданы условия для фазового перехода вещества из кристаллической в аморфную структуру. Не исключается и возможность обратного перехода.

В настоящее время уже получен серьезный экспериментальный материал, достоверность которого позволяет рассматривать трансформацию кри-

сталлической структуры в аморфную (или наоборот) как один из важнейших постулатов, отражающих физическую сущность процессов микро- нанорезания.

Установлено, что *признаки пластической деформации проявляются в процессе обработки хрупких материалов при толщине срезаемого слоя меньшей 1 мкм. Так, резание кремниевых пластин показало, что стружкообразование в пластическом режиме обнаруживалось при толщинах срезаемого слоя меньше, чем радиус закругления режущей кромки ρ . Существует и верхняя граница толщин для этого радиуса, за пределами которой пластический режим стружкообразования снова трансформируется в хрупкий. Прецизионная токарная обработка кремния с $a = 1$ мкм ($a < a_{кр}$). обеспечивает шероховатость поверхности в пределах $R_z = 12,86$ нм, что возможно получить только в режиме пластического разрушения.*

6.2. Роль гидростатического давления при реализации пластического режима стружкообразования

Исследованиями установлена существенная роль гидростатического давления в зоне резания для формирования режима пластической деформации при разрушении хрупких материалов, например, при резании кремния вставкой из монокристалла алмаза с большим отрицательным передним углом, с нанометрической толщиной срезаемого слоя.

Именно гидростатическое давление порождает тот высокий уровень сжимающих напряжений, который инициирует трансформацию кристаллической структуры в аморфную, когда большинство границ межатомных связей существенно увеличивается, что и делает материал менее твердым и более пластичным. Такие сжимающие напряжения и возникают при резании кремния резцом из монокристалла алмаза с большим отрицательным передним углом и с нанометрической толщиной среза.

Эксперимент был осуществлен внутри аппарата высокого внешнего гидростатического давления. Критическая глубина для пластического режима резания может быть увеличена за счет наложения ультразвуковых колебаний на режущий инструмент. Особенность, выявленная в эксперименте, заключалась в том, что образование пластической стружки проявилось при чрезвычайно низких скоростях резания. При этом поверхность, обработанная инструментом с монокристаллом алмаза, оказалась лучше, чем для инструмента с поликристаллическим алмазом.

6.3. Влияние толщины срезаемого слоя и величин радиуса округления режущей кромки на режим стружкообразования

Стружкообразование в пластическом режиме реализуется, как правило, при толщинах срезаемого слоя меньших, чем величина радиуса округления режущей кромки. При этом стружка контактирует с участком криволинейной передней поверхности, где передний угол отрицательный.

Для примера на рис. 6.1 приведена схема, использованная при исследовании процесса нанорезания карбида вольфрама на токарном станке с ЧПУ при условиях, приведенных в табл.6.1. Положение обрабатываемой поверхности составляло некоторый угол с вектором скорости главного движения инструмента с тем, чтобы толщина срезаемого слоя постепенно нарастала от 0 до 10 мкм.

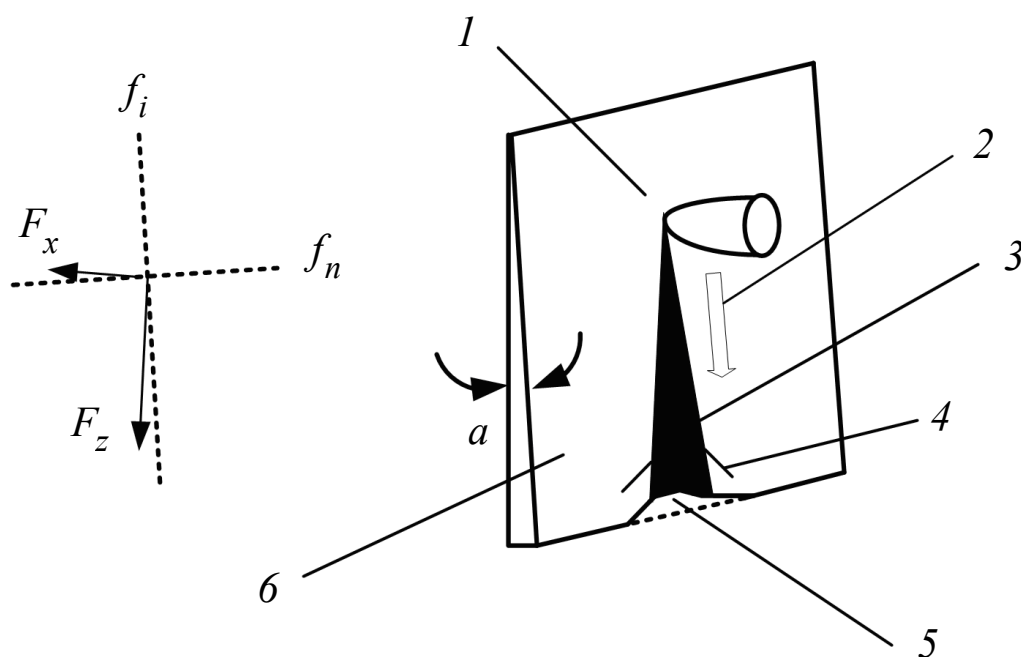


Рисунок 6.1 – Схематическая иллюстрация экспериментальной установки нанорезания:

1 – твердый КНБ инструмент; 2 – направление формирования канавки; 3 – канавка; 4 – трещина; 5 – взрыв или разрушение; 6 – наклоненный образец

В ходе резания стружка формировалась как непрерывная (сливная), пока толщина срезаемого слоя была меньше критического значения, т. е. при этом реализовывался пластический режим стружкообразования. Когда она

превышала критическое значение, стружка не была непрерывной, т. е. механизм стружкообразования переходил в хрупкий режим. Среднее критическое значение толщины срезаемого слоя оказалось равным 4,7 мкм, меньшим, чем радиус округления режущей кромки инструмента – $\rho = 5,2$ мкм.

Таблица 6.1 – Исходные условия экспериментального нанорезания

Обрабатываемый материал	карбид вольфрама
Инструментальный материал	кубический нитрид бора
Радиус округления режущей кромки, ρ , мкм	5,2 мкм
Толщина срезаемого слоя, a , мкм	0–10
Передний угол, γ , град.	29,6°
Задний угол, α , град.	11°
Скорость резания, V , м/мин	144
Критическая толщина срезаемого слоя, $a_{кр}$	$\approx 4,7$ мкм

Для других условий минимальная толщина срезаемого слоя, измеренная с технически достижимой точностью, составляла около 1 нм, т. е. 1/20–1/10 радиуса округления режущей кромки, которой производилось резание.

Превышение критического значения толщины срезаемого слоя привело к формированию стружки надлома (хрупкое разрушение), а в приповерхностном слое – к развитию трещин.

Наличие для каждой системы резания своего критического значения толщины срезаемого слоя позволяет, определив его, прогнозировать выходные показатели процесса, а в равной степени рационально выбирать нано-объекты системы.

Таким образом, экспериментальные исследования выявили, что трансформация механизмов пластичного и хрупкого разрушения в нанопроцессе стружкообразования происходит вследствие большого гидростатического давления и температуры в области вершины режущего лезвия и зависит, прежде всего, от соотношения толщины срезаемого слоя и радиуса округления режущей кромки инструмента или от соотношения текущего значения толщины срезаемого слоя и его критического значения, уровня гидростатического давления в зоне вершины режущего клина и уровня температуры.

6.4. Влияние режима стружкообразования на качество обработанной поверхности

Экспериментально доказана возможность получения качества обработанной поверхности при нанорезании лезвийным инструментом того же уровня, что и при полировании.

Состояние поверхности и достигаемая точность нанообработки во многом определяется характером стружкообразования и, в частности, минимальной толщиной срезаемого слоя недеформированной стружки. Последняя может быть определена с помощью минимального межатомного расстояния в материале заготовки и скорректирована с учетом остроты лезвия (радиуса округления) алмазного режущего инструмента, возможностей ультрапрецизионного станка, технологической среды, словом, от нанообъектов, составляющих систему нанорезания. Экспериментально достигнуто значение минимальной толщины недеформированной стружки вплоть до 1 нм с использованием специально подготовленных ультраточных алмазных инструментов и высоконадежных ультрапрецизионных станков. При этом начальная стадия стружкообразования наблюдалась уже при толщине недеформированной стружки 0,26 нм, соответствующие данные приведены в (табл. 6.2).

Выявлено, что доля энергии, израсходованной на деформацию материала под задней поверхностью лезвия (практически идеально острого), намного больше, чем при макрорезании.

Таблица 6.2 – Соотношение минимальной толщины недеформированной стружки, толщины срезаемого слоя и радиуса округления режущей кромки

Радиус округления режущей кромки, ρ , нм	1,57	1,89	2,31	2,51	2,83	3,14
Минимальная толщина недеформированной стружки, a , нм	0,26	0,33	0,42	0,52	0,73	0,97
Отношение минимальной толщины недеформированной стружки к радиусу округления лезвия, a/ρ	0,17	0,175	0,191	0,207	0,258	0,309

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Принципиальной отличительной особенностью микро- и нанорезания является возможность трансформации механизмов разрушения при стружкообразовании, т. е. хрупкие материалы в системах нанорезания могут вести себя как пластичные, образуя соответственно стружки типа сливной или суставчатой (вместо стружки надлома). Признаки пластической деформации проявляются при обработке хрупких материалов при толщине срезаемого слоя менее 1 мкм.

2. Гидростатическое давление в окрестностях вершины режущей кромки порождает такой высокий уровень сжимающих напряжений, при котором количество границ межатомных связей увеличивается, что инициирует трансформацию кристаллической структуры в аморфную.

3. Особенностью нанорезания является тот выявленный экспериментальным факт, что в условиях нанорезания (см. табл. 6.1) обрабатываемый карбид вольфрама образует стружки в пластическом режиме $a < \rho$, например, толщина среза $a = 4,7$ мкм, а радиус округления $\rho = 5,2$ мкм. Увеличиваются затраты удельной энергии.

4. При нанорезании качество обработанной поверхности может быть достигнуто как и при полировании. Экспериментально достигнутое минимальное значение недеформируемой стружки – до 1 нм, при этом начальная стадия стружкообразования наблюдалась при толщине стружки 0,62 нм (см. табл. 6.2).

*... Идея может представлять собой сокровище.
Но эти идеи также редки, как алмазные
россыпи на земном шаре.*

О. Бальзак

Тема 7

АЛМАЗНОЕ НАНОТОЧЕНИЕ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ. ОСОБЕННОСТИ РЕЗАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

План:

- 7.1. Алмазное наноточение хрупких материалов.
 - 7.2. Условия реализации обработки в пластическом режиме.
 - 7.3. Особенности резания наноструктурированных материалов.
 - 7.4. Изменение исходных свойств наноматериалов в процессе обработки.
- Заключение.

7.1. Алмазное наноточение хрупких материалов

Процессы нанорезания применяются для получения принципиально нового уровня высококачественной обработки широкого спектра материалов – металлических, полупроводниковых, стекла, керамики, различных монокристаллов, особенно при миниатюризации изделий. На рис. 7.1 представлена схема алмазного наноточения, реализующая вращение заготовки и линейного перемещения стола с режущим инструментом. Традиционная обработка хрупких материалов сопряжена с появлением дефектов на поверхности и в приповерхностном слое. Особенности нанорезания, рассмотренные в лекции 6, позволяют при определенных условиях поддерживать во времени пластический механизм стружкообразования и тем самым избегать субмикротрещин и дефектов поверхности при нанорезании. Например, при нанообработке кремния и германия (линзы) реальное пластическое деформирование возникает вдоль вершины лезвия в той зоне, где толщина срезаемого слоя меньше, чем критическое значение $a_{кр}$. За пределами этой зоны материал разрушается хрупко. Для получения поверхностного слоя толщиной y_c , свободного от дефектов, подача S круговой режущей кромки должна быть чрезвычай-

но малой (рис. 7.2), поэтому более рационально использование алмазных инструментов с прямолинейной режущей кромкой (рис. 7.3).

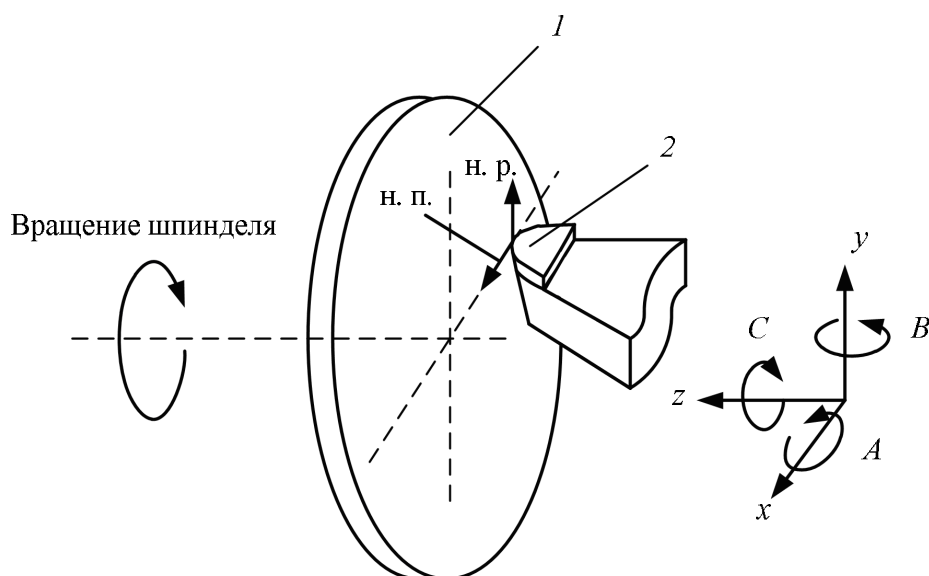


Рисунок 7.1 – Схематическое представление алмазного точения:

н. п. – направление подачи; н. р. – направление резания;

1 – заготовка; 2 – алмазный инструмент

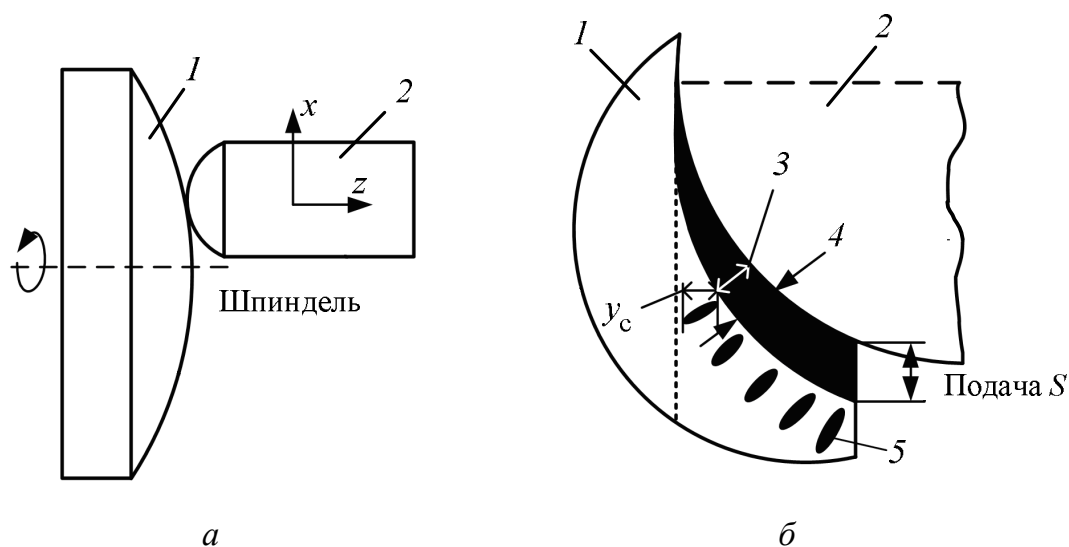


Рисунок 7.2 – Схематические модели обработки асферической поверхности инструментом с дуговой режущей кромкой:

а – дуговой огибающий метод; б – модель обработки;

1 – подложка асферической линзы; 2 – алмазный инструмент;

3 – критическая глубина a_{z_k} ; 4 – толщина среза a_z ; 5 – трещины

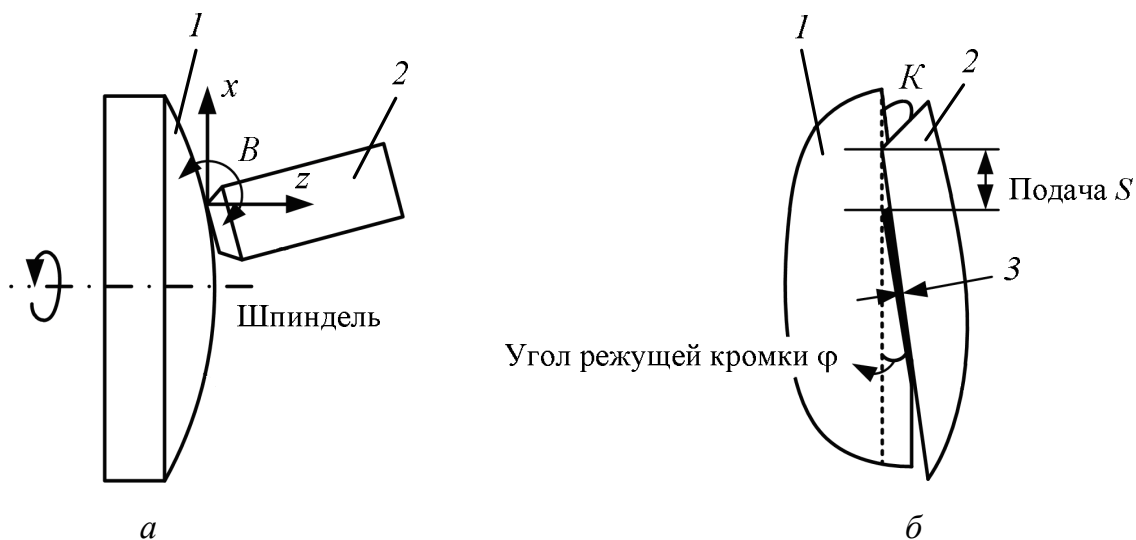


Рисунок 7.3 – Схематическая модель обработки асферической поверхности инструментом с прямолинейной режущей кромкой:

a – прямолинейный огибающий метод; *б* – модель обработки;

1 – подложка асферической линзы; *2* – алмазный инструмент с прямой кромкой;

3 – толщина среза $h < a_{z_k}$

По этой схеме движение огибания инструментом асферической поверхности состоит из перемещения в направлении осей x и z и вращения вокруг оси B , перпендикулярной плоскости $x - z$. Обработка реализована на трехкоординатном станке, обеспечивающем точность линейных движений 10 нм на один шаг, а вращение стола вокруг оси B с разрешающей способностью угловых движений $0,001^\circ$. Прямолинейная режущая кромка последовательно огибает заготовку, формируя асферическую поверхность.

7.2. Условия реализации обработки в пластическом режиме

Когда толщина срезаемого слоя a определяется подачей S_0 и углом в плане ϕ , минимизируя угол ϕ можно минимизировать толщину срезаемого слоя a меньше критической даже при сравнительно большой подаче. В таком случае достигаются условия пластического режима стружкообразования, повышается эффективность обработки и срок службы инструмента. Достигается в результате обработки зеркальная поверхность с $R_z = 10$ нм и погрешностью формы 0,2 мкм.

Существование пластического режима стружкообразования при наноточении номинально хрупких материалов подтверждается электронными ми-

крофотографиями полученной стружки. При точении номинально хрупких материалов достигались условия нанорезания, предопределяющие реализацию пластического режима стружкообразования (рис. 7.4). Обработка кремния выявила высокую изнашиваемость алмазного инструмента, причиной чего являются такие механизмы, как тепловые, химические, механические и др.

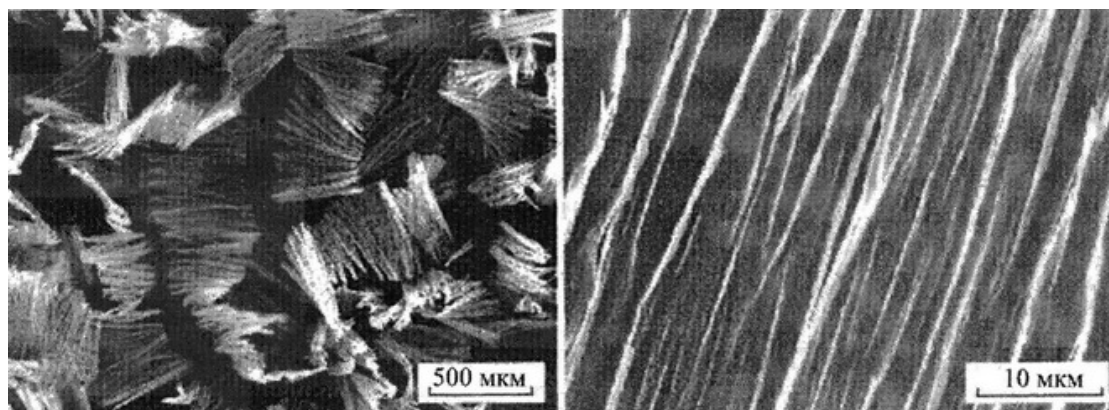


Рисунок 7.4 – Сканирующая электронная микрофотография стружки

Вместе с тем пластический режим стружкообразования не исключает полностью появления дефектов в материале приповерхностного слоя: микроструктурных изменений, дислокаций, напряжения. Под поверхность могут формироваться аморфные слои, например, при алмазном точении кремния. Эти повреждения меньше, чем при шлифовании, но более значительные, чем в процессе химико-механического полирования (рис. 7.5).

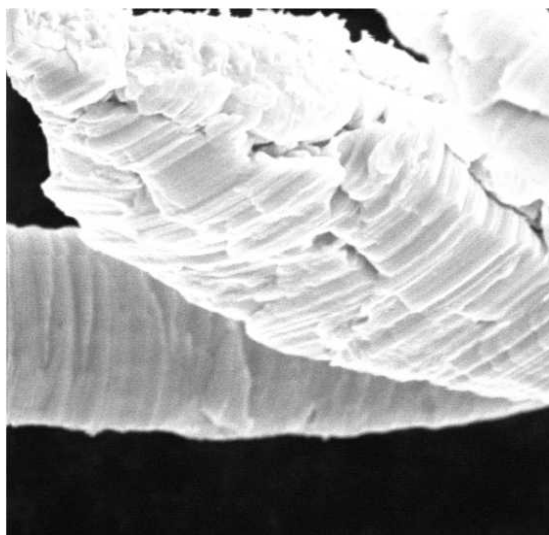


Рисунок 7.5 – Поверхность стружки, которая показывает области сдвигов, несплошности и микротрещины

7.3. Особенности резания наноструктурированных материалов

Размерные эффекты, хрупко-пластический переход, пластическая и упругая деформации, параметры сечения среза, малые значения глубины резания и подачи позволяют рассматривать нанорезание как процесс монокристаллической природы. Следовательно, механизм стружкообразования зависит от кристаллографических факторов – их ориентации, системы скольжения, образования и движения дислокаций. Например, механизм снятия (удаления) материала (припуска) на наноуровне можно рассматривать как выдавливание в пластическом режиме.

К настоящему времени обрабатываемость наноструктурированных и субмикрокристаллических материалов изучена еще относительно мало. В частности, в работе рассматривается система нанорезания, в которой нанообъекты не являются преобладающими, т. е. рассматривается наносистема резания третьего уровня. Условия резания: однозубая торцевая фреза из твердого сплава ВК8; передний угол $\gamma = 0^\circ$; задний угол $\alpha = 20^\circ$; углы в плане $\varphi = 60^\circ$; $\varphi_1 = 30^\circ$; угол наклона главной режущей кромки $\lambda = 15^\circ$; фаска вдоль главной режущей кромки $f = 0,5$ мм; глубина резания $t = 0,5$ мм; скорость резания $V = 30 \dots 160$ м/мин; подача $S_z = 0,09 \text{--} 0,14$ мм/зуб. В качестве обрабатываемых материалов рассмотрены обычные и наноструктурированные титан (табл. 7.1) и медь.

Таблица 7.1 – Механические свойства чистого титана в нанокристаллическом и крупнокристаллическом состояниях

Физико-механические свойства	Наноструктурный Ti	Крупнокристаллический Ti
Плотность, г/см ³	4,492	4,54
Предел прочности, МПа	960	460
Предел упругости, МПа	434	238
Предел текучести, МПа	725	380
Относительное удлинение, %	10	26
Относительное сужение, %	45	60
Микротвердость, МПа	2821	1800

Исследователи отмечают улучшение обрабатываемости наноструктурированного титана при скорости резания менее 100 м/мин за счет снижения адгезионной составляющей коэффициента трения из-за уменьшения склонности к адгезионному взаимодействию наноструктурированного обрабатываемого и инструментального материалов системы. По этой же причине уме-

нышается коэффициент продольной усадки стружки при скорости резания менее 100 м/мин. С дальнейшим повышением скорости резания (> 100 м/мин) различие между резанием крупнокристаллических и наноструктурированных материалов нивелируется.

Установлено, что с ростом скоростей резания в диапазоне до $V = 1070$ м/мин усадка стружки снижается, но для субмикрокристаллического титана она остается существенно ниже, чем для титана крупнокристаллического. Это отражает то обстоятельство, что субмикрокристаллический титан характеризуется меньшей пластичностью, а одновременным уменьшением трения из-за роста температуры объясняют снижение значений коэффициента усадки стружки.

7.4. Изменение исходных свойств наноматериалов в процессе обработки

Выявлено доминирующее влияние уровня температуры и продолжительности действия теплового источника на изменение исходных свойств нанокристаллического материала, проявляющееся в увеличении исходных зерен и межзеренных границ. Следовательно, процесс резания наноструктурированного материала необходимо строить так, чтобы сохранялись исходные свойства последнего.

Коэффициент усадки в случае обработки меди субмикрокристаллической структуры в указанном скоростном диапазоне ниже, чем для крупнокристаллической, с той лишь особенностью, что вначале это различие весьма большое, но при $V \approx 90$ м/мин оно стабилизируется, оставаясь не столь существенным.

Составляющие силы резания P_z и P_y в диапазоне $V = 10 \dots 50$ м/мин, $S = 0,05 \dots 0,25$ мм/об и $t = 0,1 \dots 0,5$ мм для субмикрокристаллического титана выше, чем для крупнокристаллического (табл. 7.2).

Таблица 7.2 – Зависимости для определения составляющих силы резания

Составляющие силы	Титан крупнокристаллический	Титан субмикрокристаллический
P_z , Н	$350t^1 S^{0,56} V^{0,2}$	$360t^{0,7} S^{0,58} V^{0,2}$
P_y , Н	$190t^{0,5} S^{0,3} V^{0,1}$	$155t^{0,4} S^{0,4} V^{0,2}$
P_x , Н	$190t^{1,6} S^{0,3} V^{0,4}$	$166t^{1,2} S^{0,5} V^{0,4}$

Резание наноструктурированной меди со скоростью $V = 30$ м/мин, подачей $S = 0,14$ мм/об и глубиной резания $t = 0,5$ мм без применения СОТС сопровождается ростом температуры до 500 К, развитием процессов возврата и рекристаллизации, в результате чего зерна «дорастают» до 500 ± 50 нм при исходном значении 250 ± 50 нм. Дальнейшее повышение скорости резания до $V = 160$ м/мин, подачи до $S = 0,24$ мм/об приводит к росту температуры до 580 К. Происходит второй этап рекристаллизации – так называемой собирательной, в процессе которой зерна достигают размеров до 1 мкм за счет поглощения мелких зерен.

Повышение шероховатости обработанной поверхности связывают (кроме общеизвестных факторов) с возможным ростом зерен в субмикrokристаллическом Ti при увеличении температуры резания. От размеров зерен зависит и микротвердость. По экспериментальным данным при исходной микротвердости 1800 МПа крупнокристаллического титана после перехода в субмикrokристаллическое состояние (после интенсивной пластической деформации) ее уровень повышается до 2900 МПа. Эта микротвердость в ходе обработки зависит от условий резания (температуры, времени нагрева, скорости резания) (табл. 7.3).

Таблица 7.3 – Влияние условий резания на микротвердость титана и меди

Условия обработки	Микротвердость титана, МПа		Микротвердость меди, МПа	
	КК	СМК	КК	СМК
Изготовление заготовки	1800	2900	600	1200
$V = 30$ м/мин $S = 0,09$ мм/об	1800	2800	600	850
$V = 160$ м/мин $S = 0,09$ мм/об	1800	2600	600	600
$V = 160$ м/мин $S = 0,24$ мм/об	1800	2400	600	700

Экспериментальные данные таблицы подтверждают существенное влияние условий резания и прежде всего температуры на изменение структуры субмикrokристаллического (наноструктурированного) титана и меди.

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Традиционная обработка резанием хрупких материалов сопряжена с появлением дефектов в приповерхностном слое и в поверхности.

В процессе нанорезания можно при определенных условиях поддерживать пластический механизм стружкообразования и тем самым избегать субмикротрещин и других дефектов поверхности и поверхностного слоя, но при этом наблюдается интенсивный износ алмазного инструмента (обработка кремния), причиной чего является комплекс реализуемых механизмов – механических, тепловых, химических и др. Достигается зеркальная поверхность с $R_z = 10$ нм и погрешность формы 0,2 мкм.

2. Пластический режим резания не всегда исключает появление дефектов – дислокаций, напряжений, микроструктурных изменений, формирования аморфных слоев, но их уровень существенно ниже, чем, например, при механохимическом полировании. Электронная микроскопия позволяет выявлять эти дефекты, а также области сдвигов, несплошности и микротрещины в теле стружки.

3. Механизм стружкообразования при нанорезании зависит от кристаллографических факторов, имеет монокристаллическую природу, охватывая размерные эффекты, хрупко-пластический переход, деформируемость системы, зарождение и движение дислокаций.

4. Механические свойства металлов в нанокристаллическом и крупнокристаллическом состоянии существенно различаются, изменяется взаимодействие их в процессе контактирования при нанорезании, например, интенсивность адгезионного взаимодействия, уменьшения коэффициента усадки стружки, особенно с увеличением скорости резания в диапазоне до $V = 1070$ м/мин. В случае обработки нанокристаллического титана усадка остается меньшей, чем для крупнокристаллического, т. к. крупнокристаллический титан более пластичен.

5. В условиях нанорезания необходимо контролировать уровень температуры резания так, чтобы сохранялись исходные свойства. Основным фактором, предопределяющим возможность структурных изменений (а, значит, и исходных свойств), является уровень температуры. Возможный рост исходных зерен влияет на твердость, шероховатость обработанной поверхности и др.

*Нет атома материала,
который не содержал бы поэзии.
Г. Флобер*

Тема 8

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРО- И НАНОРЕЗАНИЯ.

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

План:

- 8.1. Инжиниринг систем микро- и нанорезания.
 - 8.2. Моделирование процессов при изучении взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом на наноуровне.
 - 8.3. Пример MD моделирования системы нанорезания.
 - 8.4. Условия реализации моделирования методом молекулярной динамики.
- Заключение.

8.1. Инжиниринг систем микро- и нанорезания

Наноинженерные системы представляют собой совокупность методов моделирования, проектирования, получения наноматериалов, их обработки, монтажа и технологий для создания емких микро- и наносистем, микропроцессорных технологий и т. д. Инжиниринг наносистем включает в себя не только дизайн, но и комплексные исследования. Нанотехнологии являются как областью научных исследований, так и сферой системного инжиниринга, прежде всего сложных систем «человек–машина». Отношение нанонаук к функциональным системам основано либо на использовании структур с определенными (зависящими от размера) свойствами, либо на отдельных или комбинированных функциональных составляющих. Микро- и наносистемный инжиниринг является достаточно новым направлением в системах инжиниринга. Но совершенно понятно, что изготовлению (сборке) сложных изделий предшествуют прецизионные технологии, прежде всего технологии точного изготовления, и в условиях микро- нанообласти может идти речь о предельной точности, т. е. об отклонениях атомно-молекулярного уровня.

Обобщенные алгоритмические схемы, применяемые в кибернетике и в трансформации материи, энергии, информации и др., являются идеализиро-

ванными представлениями функционирования любой системы (в том числе и системы нанорезания) и одновременно отправной точкой для компьютерного программирования. Дальнейшие манипуляции с моделью могут быть сделаны с помощью тех или иных языков и методов моделирования. В микро- нанотехнологиях такие обобщенные алгоритмические схемы могут быть алгоритмом точения, фрезерования, шлифования, литографии и алгоритмом передачи изображения сканирующими зондовыми микроскопами.

Нанотехнологии интересны еще и тем, что они имеют двойную ориентацию – научные исследования природных (естественных) явлений и воплощение в реальность различных концепций.

Таким образом, наносистема (естественно искусственная система) – это явление, которое подчиняется законам природы, а с другой стороны, наносистема – это объект, который необходимо создать искусственно.

Основной целью эксперимента является искусственное подтверждение физических законов (полученных теоретически), а инженерные решения направлены на развитие искусственных технических средств, предназначенных для удовлетворения конкретных человеческих надобностей.

Экспериментальные исследования процессов нанорезания различных материалов весьма трудоемки и дорогостоящи. Достаточно учесть количество и характер нанообъектов, составляющих систему резания. К примеру, для исследования микро- и нанорезания используются сверхточные миниатюрные станки, специальные режущие инструменты, а инструментальные системы связывают с электронным сканирующим микроскопом.

Поэтому одновременно с экспериментальными много внимания уделяется исследованиям нанорезания моделированием (симуляцией) нанопроцессов, протекающих в зоне взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала.

8.2. Моделирование процессов при изучении взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом на наноуровне

Компьютерное моделирование осуществляется с использованием метода конечных элементов (чаще для исследования упруго-пластического напряженного состояния, деформации и т. д.) и методом молекулярной динамики (MD), который обладает большими потенциальными возможностями.

Наиболее успешно при изучении микро- и нанорезания применяется моделирование методом молекулярной динамики MD.

Метод молекулярной динамики – это собирательный термин, обозначающий несколько численных методов решения различных физических задач путем моделирования движения атомов, молекул, коллоидных и тому подобных наночастиц, составляющих исследуемую систему нанорезания. Изменение во времени исследуемой системы множества взаимодействующих атомов или частиц отслеживается интегрированием уравнений их движения. Законы движения частиц находят при помощи методов классической механики.

Метод классической молекулярной динамики благодаря использованию ЭВМ позволяет исследовать систему, состоящую из десятков тысяч и до нескольких миллионов атомов во времени порядка сотен наносекунд.

Этот метод позволяет не только определять (прогнозировать) траектории атомов и молекул под действием системы сил резания, но и учитывать выделение и распределение тепла в процессе удаления металла при лезвийной обработке, тем самым учитывать трение в рассматриваемом перечне атомных факторов.

Метод молекулярной динамики базируется на достижениях таких разделов науки, как материаловедение, микромеханика, динамика, термодинамика, численное интегрирование, использует их для описания атомного взаимодействия, уравнений движения, исходной конфигурации системы нанорезания, энергетического баланса, граничных условий и т. д. Центральной особенностью метода MD является взаимодействие «частица-частица». Такое взаимодействие между частицами определяется функциями, которые описывают потенциальную энергию. Описание с помощью такой функции и особый набор параметров материала приводят к самоорганизующейся известной структуре как функции переменных состояний. Это обеспечивает расчет процесса резания на наноуровне.

Наиболее простым представлением взаимодействия множества тел является сумма взаимодействия двух тел «частица-частица», так называемый парный потенциал. Потенциалы описывают химически активные материалы как связи, которые могут быть распространены на большие области.

Молекулярная динамика охватывает макроскопическую, необратимую и обратимую микромеханику. Уравнения термодинамики являются связующим звеном между микромеханическим состоянием совокупности атомов и молекул с одной стороны, и макроскопической окружающей средой – с другой. Термодинамические уравнения дают количественную оценку температуры системы и гидростатического давления в модели и позволяют опреде-

лить изменение энергии, вызванное смещением и деформацией нанообъектов в процессе нанорезания. При этом под термином «механическое состояние» микроскопической системы понимается перечень существующих координат и скоростей для нанообъектов системы резания.

Термодинамические свойства являются характеристикой объемной материи. Поэтому обычно в методе MD используются два типа ограничений: фиксированные и периодические. Периодические граничные условия (ПГУ) вводятся во избежание отражения от жестких ограничений, чтобы было возможным изучение объемных и объемно-связанных структур без влияния ограничений в малых моделях. Фиксированные атомные ограничения граничат со всеми свободно перемещающимися атомами внутри закрытого блока из неподвижных атомов и представляют для них границы с одной или более сторон.

8.3. Пример MD моделирования системы нанорезания

Процессы нано- и микрорезания основываются на удалении с поверхности заготовки обрабатываемого материала толщиной несколько атомов или атомных слоев. На рис. 8.1 представлены нанообъекты, составляющие систему нанорезания и одновременно неотъемлемые составляющие элементы ее моделирования методом MD.

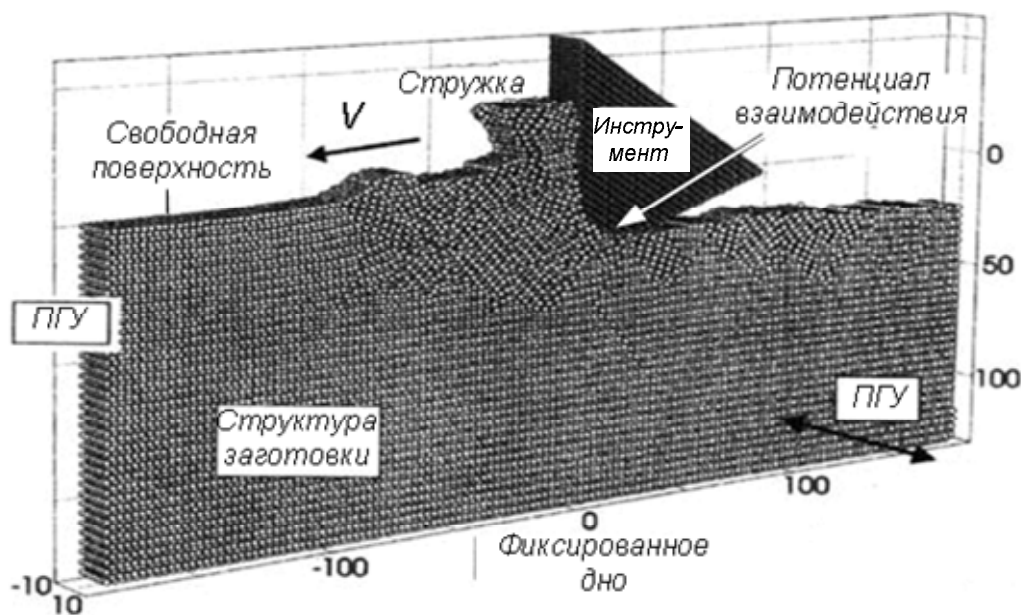


Рисунок 8.1 – Схема и граничные условия 3D модели MD процесса нанорезания

Надо также учитывать свойства материала обрабатываемого и инструментального, взаимодействие между нанообъектами, условия контактирования и связей между режущей кромкой лезвия и заготовкой, а также окружающей средой. Важными являются и граничные условия в рамках модели (поверхности по сравнению с объемным материалом) и ограничение системы до не моделируемого пространства.

8.4. Условия реализации моделирования методом молекулярной динамики

Эффективность вычислений при моделировании MD на атомном уровне во многом предопределяется полнотой описания взаимодействия между атомами как множества мелких частиц. Отдельные тела или определенный материал описывается его химическими элементами и их координатами. Координаты дают информацию о расположении атомов, т.е. о структуре материала, которая может быть установлена, например, для металлов на основе известного типа решетки и ее констант.

Важной особенностью применения MD моделирования является то, что все нанообъекты системы резания представляются в 3D системе координат, даже если ширина выбранной модели составляет всего одну элементарную ячейку, т.к. 2D модели не позволяют адекватно описать 3D кристаллическую структуру металла.

Поскольку сьем материала при резании есть результат относительного перемещения и взаимодействия инструмента и заготовки, то необходимо, чтобы модель MD включала, по крайней мере, их поверхности в области контакта и достаточное количество материала. При этом инструмент обычно рассматривается как абсолютно жесткое тело, оказывающее воздействие вершиной режущего клина (лезвия) на заготовку (см. рис. 8.1), передающие ей энергию, в результате чего растет температура.

Термостатические атомные слои позволяют контролировать их температуру за счет отвода энергии в мнимую не моделируемую область – внутрь заготовки.

Обработка представляет собой массивный процесс деформации. Относительное перемещение может рассматриваться как для модели лезвия, так и для граничных атомов заготовки. Когда лезвие, перемещаясь, контактирует с 3D поверхностью заготовки, деформация вынуждает материал нагромож-

даться на передней поверхности режущего клина, в результате чего формируется стружка.

При помощи вычислений метода MD определяются координаты атомов, что позволяет визуализировать мгновенные положения и отслеживать движения атомов как единичных, так и их групп.

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Наноинженерные системы представляют собой совокупность методов моделирования, проектирования, получения наноматериалов, их обработки, монтажа технологий для создания емких микро- и наносистем, микропроцессорных технологий и т. д. Нанотехнологии уже являются не только областью научных исследований, но и сферой системного инжиниринга. Вклад в потенциал нанотехнологий вносит их двойная ориентация: научные исследования природных явлений и воплощение в реальность различных новых концепций.

2. В силу сложности объекта и явлений, базирующихся на атомно-молекулярном строении изучаемой среды, и взаимодействия в ней нанообъектов, экспериментальные исследования в нанобласти очень сложны и дорогостоящи, что и побуждает исследователей уделять внимание моделированию процессов микро- и нанорезания.

3. Наиболее успешно используется метод молекулярной динамики, позволяющий исследовать систему, состоящую из десятков тысяч и до нескольких миллионов атомов во времени порядка сотен наносекунд. Центральной особенностью метода MD является исследование взаимодействия «частица–частица», поскольку речь идет об атомно-молекулярной манипуляции.

4. Молекулярная динамика – это собирательное понятие (термин), объединяющее несколько численных методов решения различных физических задач путем моделирования движения атомов, молекул, коллоидных и тому подобных наночастиц, составляющих систему нанорезания. Временные изменения системы, связанные с взаимодействием множества частиц, отслеживается интегрированием уравнений их движения. Законы движения частиц находят при помощи методов классической механики.

5. Метод позволяет прогнозировать траектории атомов и молекул под действием системы сил резания, учитывать тепловыделение, распределение

тепла, рассматривать трение на атомно-молекулярном уровне. Молекулярная динамика охватывает макроскопическую, необратимую и обратимую микро-механику.

6. Уравнения термодинамики связывают микромеханические состояния совокупных атомов и молекул с макроскопической окружающей средой, дают количественную оценку температуры, гидростатического давления, определять изменение энергии, вызванное смещением и деформацией нанообъектов в процессе нанорезания. Под механическим состоянием микро- и наноскопической системы понимают перечень существующих координат и скоростей для нанообъектов системы нанорезания.

7. Все нанообъекты системы резания по MD-методике представляются в 3D системе координат, т. к. 2D модели не позволяют адекватно описать 3D кристаллическую структуру металла.

8. Благодаря вычислениям по методу MD определяются координаты атомов, что позволяет визуализировать мгновенные положения и отслеживать движения атомов как единичных, так и их групп. Метод MD позволяет прогнозировать выходные параметры процессов микро- и нанорезания, оптимизировать их, добиваясь новых, более важных результатов.

*Идея есть бесплотное существо,
не имеющее существования само по
себе, но которое дает образ
и форму бесформенной материи
и становится причиной ее появления.*

Плутарх

Тема 9

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ МИКРО- И НАНОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

План:

9.1. Моделирование процесса ортогонального микро- и нанорезания материалов.

9.2. Моделирование процессов нанорезания в пластическом режиме стружкообразования.

9.3. Недислокационный механизм пластичности.

Заключение.

9.1. Моделирование процесса ортогонального микро- и нанорезания материалов

Метод молекулярной динамики применяют для исследования различных процессов микро- и нанорезания и в общем случае – для исследования взаимодействия практически любых нанообъектов, которые могут быть представлены организованной совокупностью атомов, молекул и др. частиц.

Возможности метода MD можно проиллюстрировать на примере моделирования ортогонального процесса нанорезания пластического монокристалла меди, условия которого представлены в табл. 9.1.

Имитировалось перемещение лезвия алмазного инструмента вдоль обрабатываемой поверхности $\{001\}$ по направлению плоскости $\langle 110 \rangle$ гексагонально центрированной кристаллической решетки монокристалла меди (рис. 9.1). В модели рассматривается огромное количество – 71000 атомов обрабатываемого материала и 11000 атомов материала инструмента.

Метод молекулярной динамики позволяет манипулировать практически неограниченным количеством атомов. Атомы, располагающиеся в нижней части и на крайних левой и правой частях модели, представляют собой фиксированные границы, которые перемещаются со скоростью резания (50 м/с и 100 м/с) относительно инструмента. Атомы в слоях, соседних с граничными атомами, называются термостатическими и контролируют температуру на границах заготовки.

Таблица 9.1 – Характеристики условий моделирования методом MD

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Обрабатываемый материал	Медь
2	Инструментальный материал	алмаз
3	Количество атомов в заготовке	71000
4	Количество атомов в инструменте	11000
5	Радиус округления режущей кромки, нм	2
6	Толщина срезаемого слоя a , нм	1–2
7	Обрабатываемая поверхность	{001}
8	Направление резания	<110>
9	Скорость резания, м/с	100 и 50
10	Временной шаг, с	$(1-1000)10^{-15}$

Передняя поверхность инструмента, деформируя материал заготовки в тончайшем атомном слое, инициирует стружкообразование по классическому дислокационному механизму. На рис. 9.1 в 2D проекции показаны области пластической деформации, дислокации и большие упругие деформации в приповерхностной области. Пластические деформации под обработанной поверхностью охватывают лишь несколько атомных слоев.

При увеличении толщины срезаемого слоя a активируется стружкообразование на передней поверхности, особенно когда соотношение $\frac{a}{\rho} \geq 1$. Для сдвоенных дислокаций в стружкообразовании возрастает, начинается их скопление. На рис. 9.2 различаются области с неодинаковой ориентацией кристаллитов, которые разделены линиями и плоскостями скольжения.

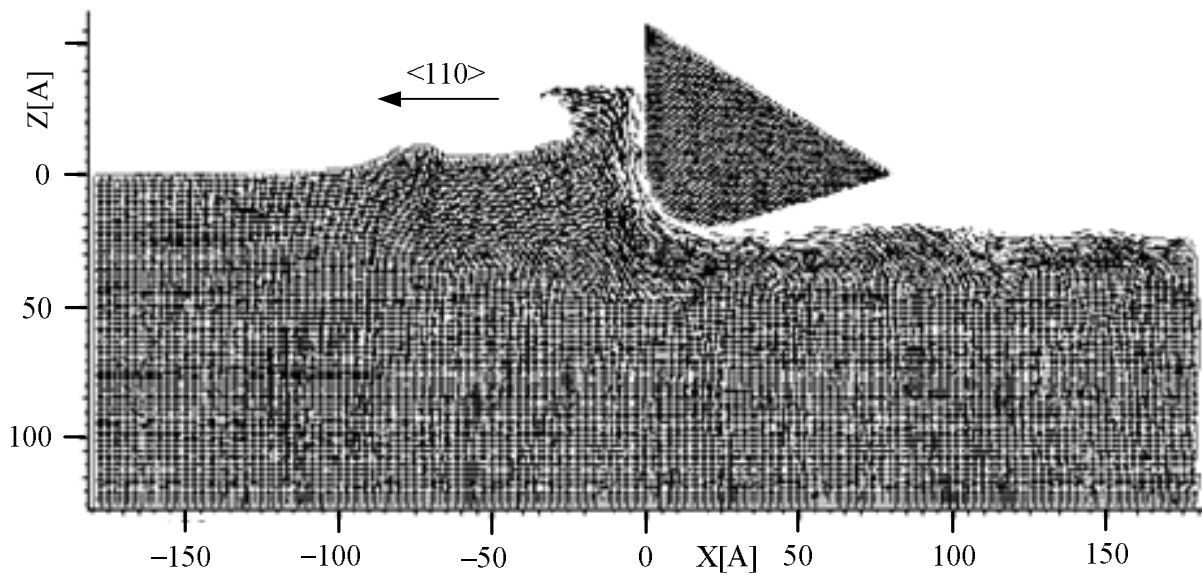


Рисунок 9.1 – Зона деформации, вид $\langle 110 \rangle$

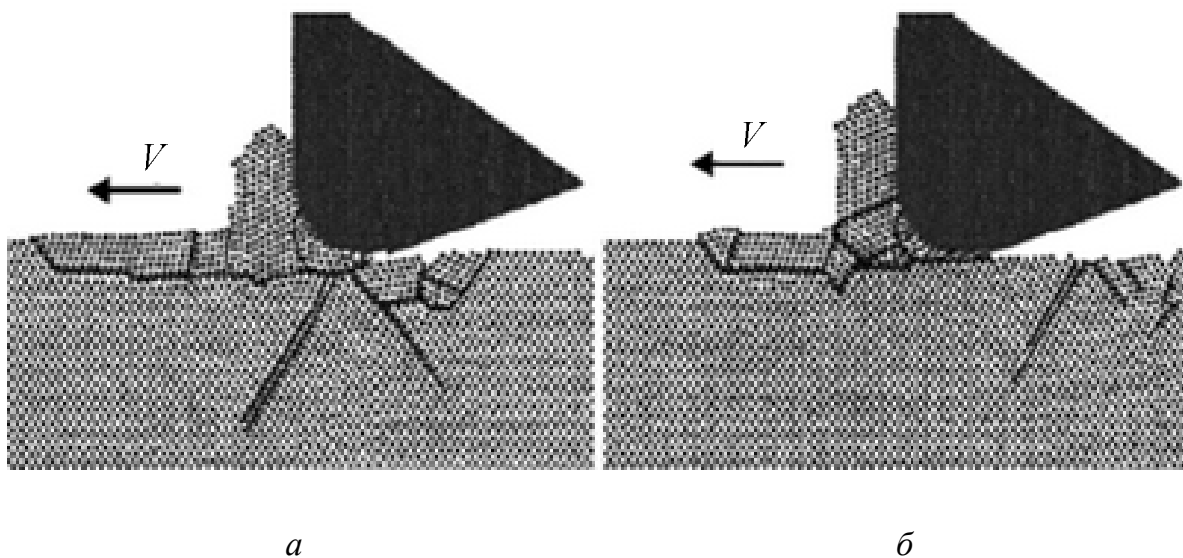


Рисунок 9.2 – Изменения микроструктуры у корня стружки в процессе стружкообразования: *а* – 163 пс; *б* – 202 пс

На деформированных монокристаллах минимальное атомное расстояние между соседними плоскостями сдвига оценивалось как примерно 50 межатомных расстояний, а на стружках оно достигало 500. Эти пачки сдвигов распределялись неравномерно, что связывают с неравномерным распределением дефектов кристаллической решетки в исходных объектах.

Модель MD позволяет рассчитать силы резания, температуру и напряжение для каждого шага времени Δt (обычно это несколько фемтосекунд $n \cdot 10^{-15}$ с). Силы резания рассчитываются как реакции сил, действующих на инструмент во время контакта его с атомами заготовки, с последующим интегрированием всех сил, действующих на атомы заготовки. Модели позволяют фиксировать мгновенные значения температуры и сил резания. Силы, действующие на инструмент, сильно колеблются, поэтому определяются их усредненные значения, например, для 1000 и более временных шагов (около 20 пикосекунд – 10^{-12} с).

Модель MD позволяет также рассчитать распределение напряжений и температуры при микро- и нанорезании как наборы мгновенных данных об индивидуальном месте положения атома и его температуры. Наглядно представляются результаты в форме постепенного распределения, т. е. контурные графики с определенным разрешением в пространстве и времени.

Моделирование MD позволило выявить значительное влияние скорости резания на нанопроцесс снятия материала, формирование наностружки. С ее изменением существенно изменяется форма наностружки, механизм ее образования, локализуется зона деформации.

Для наноабразивных процессов MD позволяет оценить роль толщины среза, форм и ориентацию абразивного зерна, радиус округления режущей кромки, связать качество поверхности с параметрами обработки.

9.2. Моделирование процессов нанорезания в пластическом режиме стружкообразования

Большинство исследователей моделировали процессы пластического стружкообразования при нанорезании для случая ортогонального резания меди, алюминия и других «мягких» материалов. Алмазный резец принимался как абсолютно жесткое тело, поэтому считается, что расстояние между его атомами не изменяется во время процесса резания. Одна из схем такого процесса приведена на рис. 9.3. Исходные условия и ограничения для моделирования колеблются в широком диапазоне – количество атомов заготовки и инструмента, величина нанорадиуса округления лезвия, толщина среза, передний и задний углы, скорость резания, среда, температура, величина временного шага.

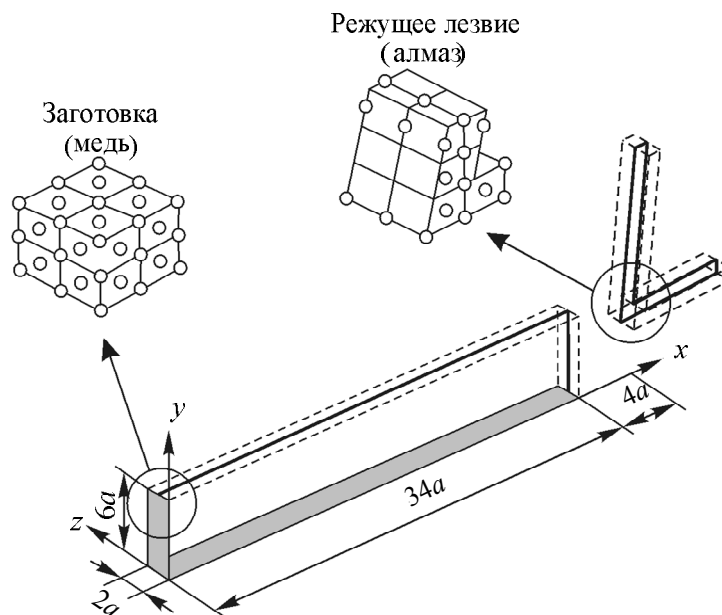


Рисунок 9.3 – Схема ортогонального процесса нанорезания:
 a – константа атомной решетки меди, $a = 3,61 \text{ \AA}$

Принципиально важным обстоятельством данной схемы является то, что в процессе нанорезания деформации рассматриваются лишь в нескольких слоях атомов, прилегающих к поверхности заготовки. Схематическая модель, взаимодействующих нанообъектов системы нанорезания, приведена на рис. 9.4.

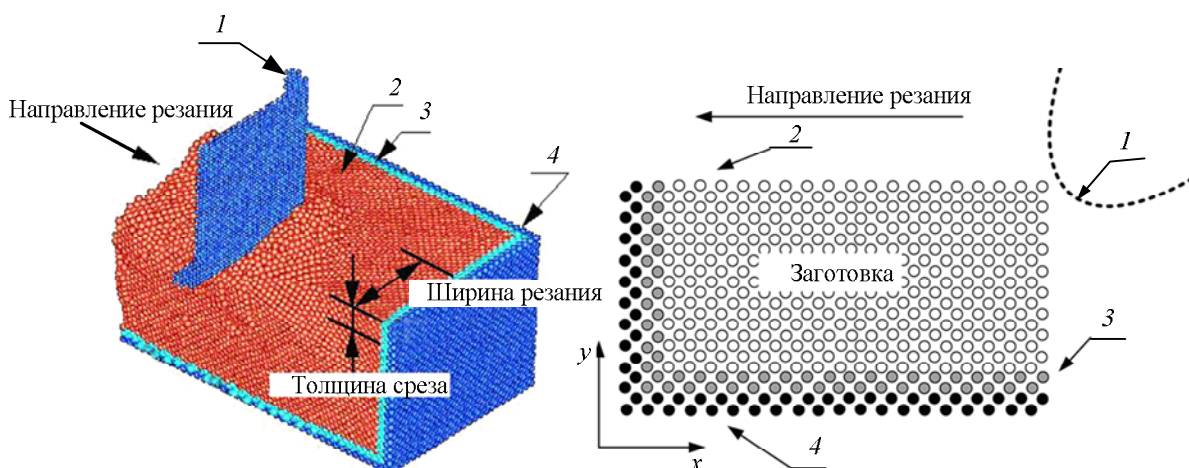


Рисунок 9.4 – Схематическая MD модель нанорезания в пластическом режиме стружкообразования: 1 – режущая кромка; 2 – ньютоновские атомы; 3 – термостатные атомы; 4 – граничные атомы

В модели MD выделены три зоны: зона *граничных атомов*, зона *термостатических (терморегулирующих) атомов* и зона *ньютоновских атомов*.

Граничные атомы поддерживают правильную симметрию решетки, снижают влияние ограничений заготовки. Движение слоя ньютоновских атомов понуждается силами давления со стороны инструмента, определяемыми по уравнению движения Ньютона. Термостатические атомы моделируют проводимость тепла. Они окружают ньютоновские атомы с тем, чтобы температуру границ модели приблизить к температуре окружающей среды.

Граничные условия поддерживаются вдоль направления, перпендикулярного поперечному сечению. Исходные данные для моделирования: радиус округления режущей кромки $\rho \leq 3,5$ нм, толщина срезаемого слоя $a = 2,8$ нм, скорость резания $V = 20$ м/с.

После начального врезания режущей кромки (рис. 9.5) атомная решетка заготовки сжимается в зоне контакта с передней поверхностью и дуги округления режущей кромки, появляются дислокации, нагромождаются, формируя стружку.

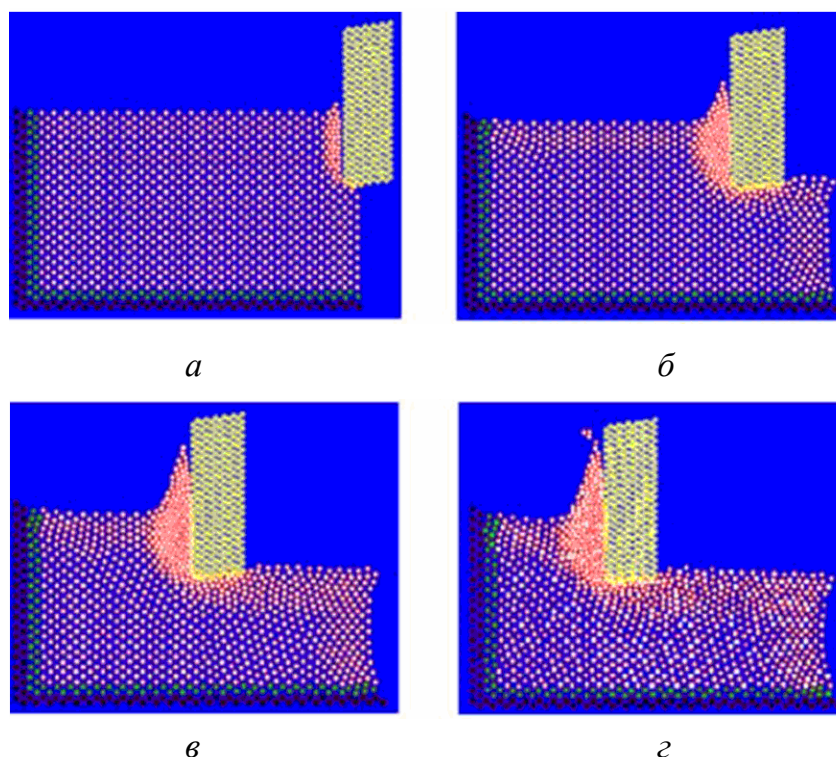


Рисунок 9.5 – Симуляция зоны деформации в процессе нанометрического резания
 скорость резания 20 м/с, толщина срезаемого слоя 1,4 нм; радиус округления режущей
 кромки 0,35 нм;
а – 3,4 пс; *б* – 17,0 пс; *в* – 30,6 пс; *г* – 37,2 пс

Стружка отделяется единым атомным кластером. Когда степень деформации (энергии деформированной решетки) достигает определенного уровня, атомы перестраиваются так, чтобы высвободить энергию деформации. Дислокации перемещаются в сторону свободной поверхности, достигают ее и исчезают.

9.3. Недислокационный механизм пластичности

При резании наноструктурных материалов возможна реализация особого механизма деформации – недислокационного механизма пластичности – зернограницного некристаллографического скольжения, благодаря малому размеру зерен, меньшему некоего критического значения и проявления сверхпластичности при достижении степени деформации 100 % и более.

После прохождения режущей кромки давление в зоне контактирования с задней поверхностью инструмента исчезает, подмятые слои приповерхностных атомов поднимаются, что приводит к упругому восстановлению, формирует обработанную поверхность (см. рис. 9.5 б).

Недислокационный механизм пластичности (зернограницного некристаллографического скольжения) моделировался на примере процесса ортогонального резания единичного кристалла меди алмазным лезвием с радиусом округления кромки, равным 3 нм, с толщиной срезаемого слоя 1 нм при скорости резания 20 м/с. Симуляция базировалась на моделировании движений дислокаций в полосе скольжения. Предполагается существование движения краевых зигзагообразных дислокаций из зоны контакта обрабатываемого материала с лезвием через зону скольжения к свободной поверхности границы зоны скольжения, соответствующего схеме стружкообразования, предложенной Н.Н. Зоревым для макрорезания.

Рис. 9.6 наглядно иллюстрирует влияние радиуса округления режущей кромки (лезвия) на процесс нанорезания через механизм зернограницного некристаллографического скольжения. При постоянной величине толщины среза нанорезания $a = 0,27$ нм проявляется нелинейная зависимость глубины проникновения деформации от радиуса округления лезвия ρ .

Выполненная симуляция в различных условиях резания (см. рис. 9.6) показала, что моделирование процесса образования стружки в наномасштабе для пластичных материалов дает такие же результаты, как и полученные в опытах по микрорезанию.

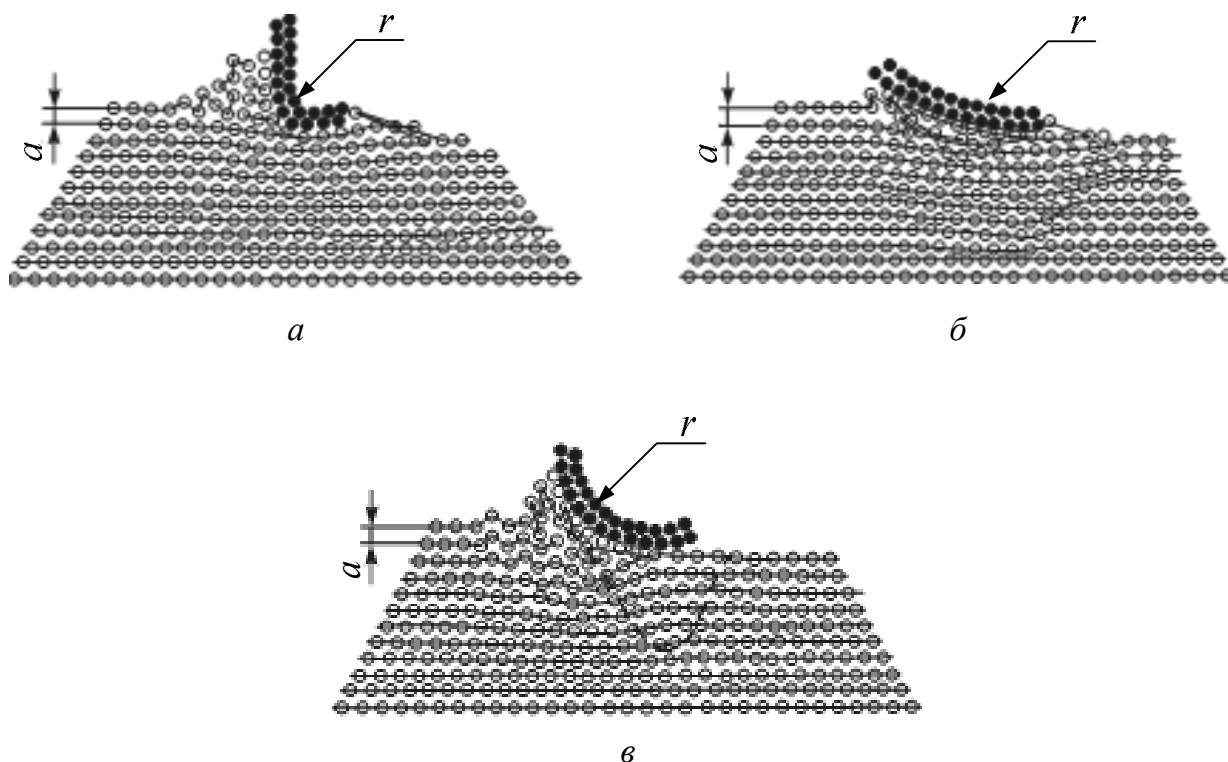


Рисунок 9.6 – Влияние величины нанорадуса округления лезвия на процесс нанорезания:

a – толщина срезаемого слоя ($a = 0,27$ нм); r – радиус округления кромки;
 $a - r = 0,5$ нм; $б - r = 5$ нм; $в - r = 1,5$ нм

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Метод молекулярной динамики пригоден для исследования различных микропроцессов резания – точения, фрезерования, сверления и др., а в общем – для исследования взаимодействия практически любых нанообъектов, которые могут быть представлены организованной совокупностью безграничного количества атомов, молекул и др. материальных частиц.

2. При исследовании процесса алмазного ортогонального точения (скорость резания 50 и 100 м/с) выявляются области пластической деформации, дислокации и большие упругие деформации. В приповерхностной области классические деформации охватывают лишь несколько атомных слоев. Когда соотношение $a/\rho \geq 1$, доля дислокаций возрастает, проявляются области с неодинаковой ориентацией кристаллитов, при этом пачки сдвигов распреде-

ляются неравномерно из-за неравномерного распределения дефектов кристаллической решетки.

3. MD моделирование позволяет рассчитать мгновенные силы нанорезания, температуру для каждого шага времени.

4. Моделирование строится таким образом, что деформации охватывают лишь несколько слоев атомов, прилегающих к поверхности заготовки. В модели рассматриваются зоны граничных, термостатических и ньютоновских атомов.

После врезания режущей кромки атомная решетка заготовки сжимается у передней поверхности и переходной (от передней – к задней), зарождаются дислокации, нагромождаются, формируя стружку, которая отделяется единым атомным кластером. Когда степень деформации (энергии деформированной решетки) достигает определенного уровня, атомы перестраиваются, высвобождая энергию деформации. По классическому механизму дислокации перемещаются в сторону свободной поверхности, достигают ее и исчезают.

5. При резании наноструктурных материалов в условиях высоких гидростатических нагрузок и высокой температуры возможна реализация особого механизма пластической деформации – недислокационного механизма пластичности – зернограничного некристаллографического скольжения. Причиной тому считают малые размеры зерен (менее определенного критического значения) и сверхпластичности при достижении степени деформации 100 % и более.

6. Выполненные исследования, симулирующие различные условия нанорезания, показали, что моделирование процесса нанорезания, прежде всего процесса стружкообразования в нанометрическом диапазоне, для пластичных материалов дает такие же результаты, как и полученные в опытах по микрорезанию.

*Великое дело никогда
не делается быстро.
Пифагор*

Тема 10

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНОРЕЗАНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

План:

- 10.1. Особенности моделирования процесса нанорезания хрупких материалов.
 - 10.2. Обработка хрупких материалов в пластическом режиме.
 - 10.3. Особенности формирования поверхности и приповерхностного слоя.
- Заключение.

10.1. Моделирование процесса нанорезания хрупких материалов

Традиционные процессы резания хрупких материалов: стекла, кремния, германия, карбидов, керамики – сопровождаются интенсивным трещинообразованием, не позволяющим производить их качественную обработку. В начале 80-х годов прошлого столетия было обнаружено, что хрупкие материалы могут обрабатываться резанием в пластическом режиме стружкообразования. Его реализация возможна в особых условиях, определяемых давлением, температурой и наличием определенного соотношения нанометрических объектов системы резания.

Моделирование методом молекулярной динамики (MD) процесса нанорезания монокристалла кремния при различных толщинах срезаемого слоя $a = 3,2$ нм, $a = \rho$, $a = 4$ нм и $a = 4,5$ нм и постоянном радиусе округления режущей кромки $\rho = 4$ нм показало два возможных результата (рис. 10.1). В первом случае ($a < \rho$) максимум деформации достигался на поверхности заготовки (см. рис. 10.1 а). По мере увеличения толщины срезаемого слоя, когда $a = \rho$, $a > \rho$ и соотношение $a/\rho \rightarrow \max$, пик зоны деформации перемещался в окрестности точки, прилегающей к переходной поверхности округления лезвия к передней поверхности (см. рис. 10.1 б, в). Следовательно, вероятность появления трещин, а, значит, и хрупкого механизма разрушения

более высокая во втором и третьем случае. Наличие трещин на поверхности предполагает такие же дефекты и в приповерхностных объемах обрабатываемого материала.

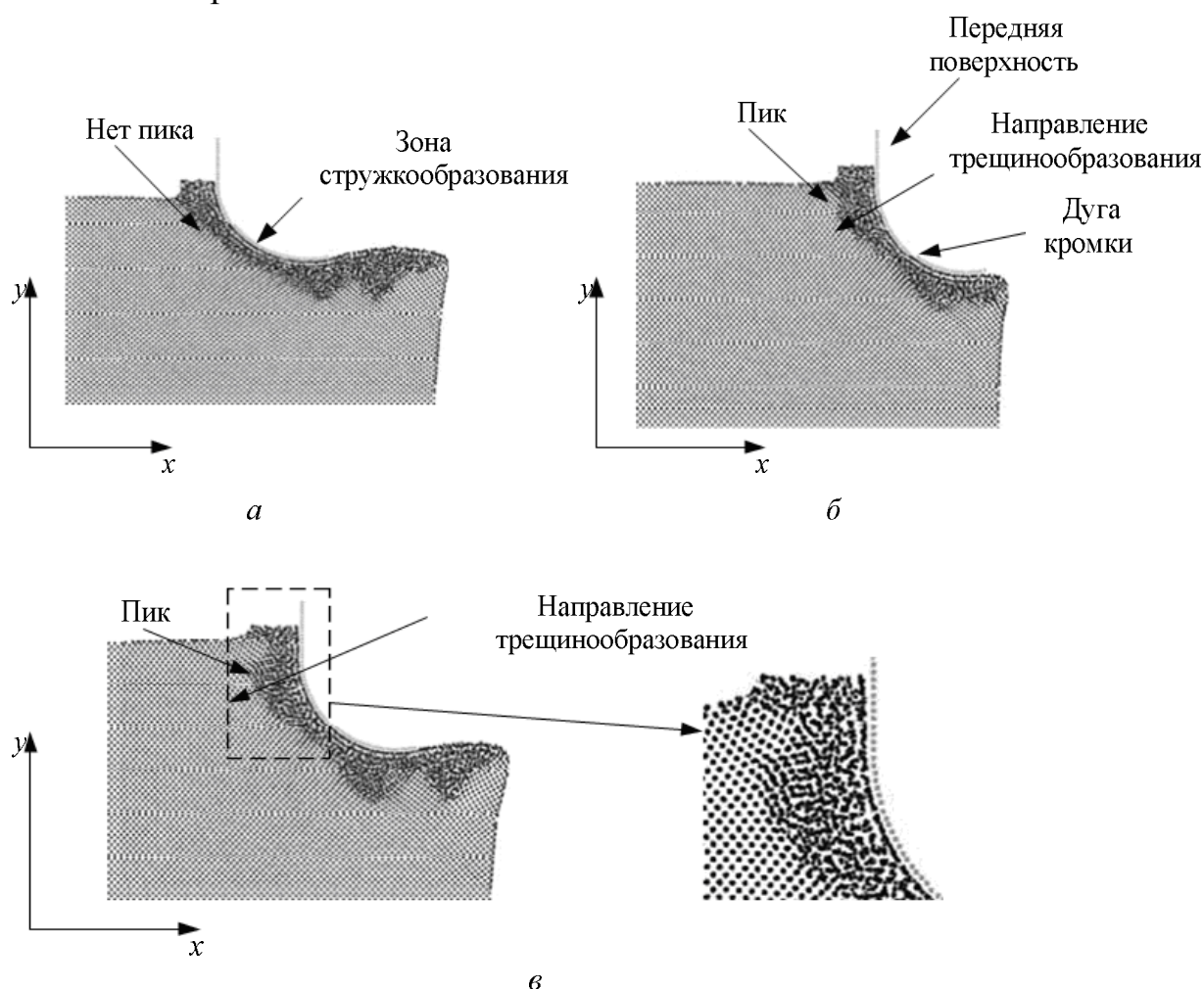


Рисунок 10.1 – Деформация заготовки в зоне стружкообразования при $\rho=4$ нм и толщинах среза: $a - a = 3,2$ нм; $б - a = 4$ нм; $в - a = 4,5$ нм

10.2. Обработка хрупких материалов в пластическом режиме

В зоне формирования стружки кристаллическая кремниевая фаза может трансформироваться в аморфную, создавая предпосылки для пластического режима стружкообразования. При $\rho = 3,5$ нм и толщине срезаемого слоя $a = 2,8$ нм ($a < \rho$) в окрестностях поверхности округления формируются чрезвычайно высокие сжимающие напряжения (порядка 12 ГПа), которые инициируют трансформацию монокристаллического кремния в аморфный. В результате изменяется атомная структура: при исходной величине межатом-

ных расстояний 2,3 А (в недеформированной зоне) пики действительных расстояний смещаются в сторону больших значений (рис. 10.2). Такая фаза кремния является металлической объемно-центрированной тетрагональной структурой, предрасположенной к пластическим деформациям. Увеличение межатомных расстояний снижает значение твердости, тем самым способствуя протеканию пластических деформаций.

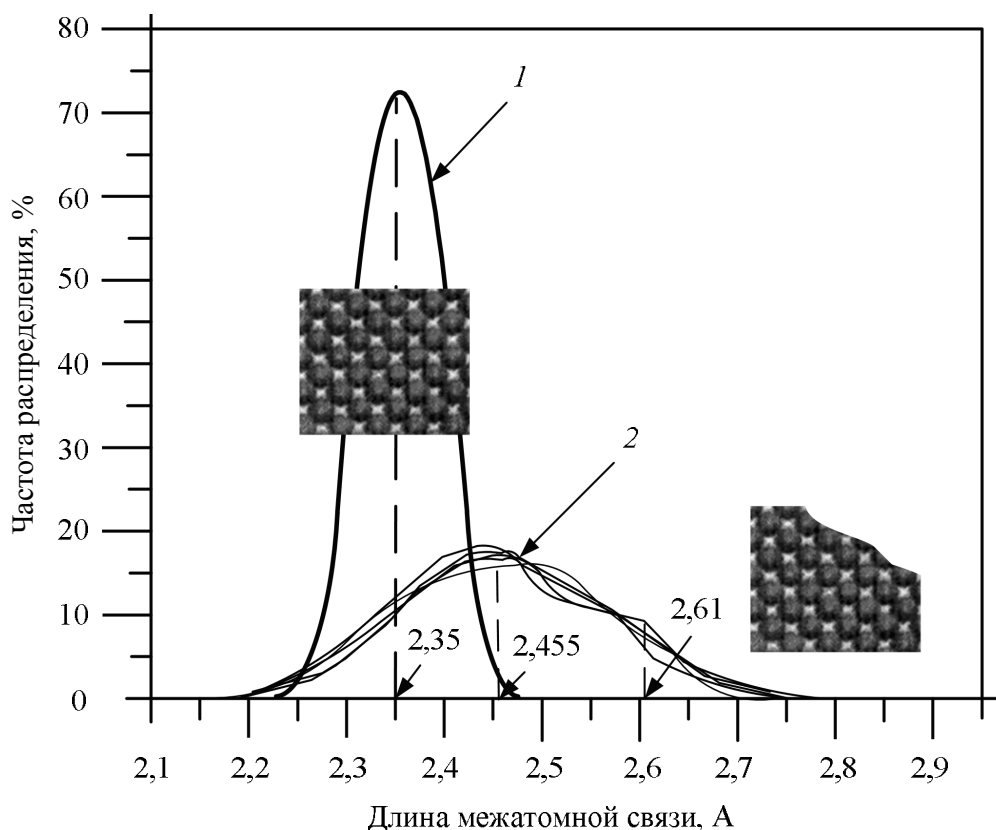


Рисунок 10.2 – Сравнение частоты распределения длины межатомных связей в заготовке из недеформированного кремния с тем же в зоне стружкообразования при различных толщинах срезаемого слоя:
 1 – недеформированный материал заготовки; 2 – зона стружкообразования при расстояниях резания: 6,0; 6,9; 7,8; 8,7; 9,6 нм

Исследования с помощью моделирования MD теоретически указывают на наличие и важную роль критических значений толщины срезаемого слоя для конкретных условий как факторов, управляющих переходом от пластического к хрупкому процессу. При точении стали с толщиной слоя 100 нм достигнута шероховатость $R_a \approx 0,6$ нм, при обработке кремния с толщиной

срезаемого слоя 1 мм – $R_a = 1$ нм. На выявленную исследованиями определяющую роль гидростатического давления в реализации фазового перехода пластического механизма формирования стружки в хрупкий и обратно указывают многие исследователи. Его связывают с определенным соотношением толщины срезаемого слоя, радиуса округления и температуры.

10.3. Особенности формирования поверхности и приповерхностного слоя

Процесс нанорезания имеет принципиальные отличия от конвенциональных процессов резания. Речь идет о сплошном взаимодействии нанообъектов системы нанорезания, масштаб которых порождает такие механизмы, которые не наблюдаются в традиционных процессах макрорезания.

При этом изменяются в балансе соотношения энергетических затрат: на образование поверхности – 5,9 %, на формирование стружки – 51,7 %, на изменения в заготовке – 42,2 %.

Моделирование формирования поверхности позволяет изучить этот процесс в связи с влиянием переменных процесса обработки, свойств обрабатываемого и инструментального материала и др. Один из применяемых посылов – обработанная поверхность формируется как своеобразный след профиля режущей кромки инструмента в его реальном пути (траектории) с учетом внутренних и внешних погрешностей. Топография поверхности, состояния инструмента и реальная траектория его движения определяют образование следов механической обработки. Моделирование выявляет степень отклонения реального пути инструмента от номинального (идеального) как результат кинематических и динамических факторов процесса резания, погрешностей механизмов станка и др. внешних помех. Исходные факторы: станки, инструменты, условия резания, свойства материала. Выходные: качество обработки, структура поверхности, топография, функциональные свойства.

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Обработка хрупких материалов (стекла, керамики, германия, кремния, карбидов) конвенциональными способами затруднена, т. к. существует потенциальная опасность трещинообразования. Однако при определенных условиях (инструмент, параметры среза, скорость, давление, температура) в ус-

ловиях гидростатического сжатия хрупкие материалы могут обрабатываться в пластическом режиме стружкообразования.

2. В зоне формирования стружки (традиционно это стружка надлома) в области, прилегающей к вершине режущей кромки, кристаллическая фаза может трансформироваться в аморфную, что создает условия для «обтекания лезвия», т. е. для проявления пластического режима стружкообразования в условиях высоких сжимающих (гидростатических) напряжений. Его реализации способствует также увеличение межатомных расстояний в решетке, снижение по этой причине (плюс температура) твердости, критические значения толщины срезаемого слоя. Все эти факторы (каждый по своему) «управляют» фазовым переходом. Соотношение толщины срезаемого слоя, температуры и давления создают предпосылки для фазового перехода пластического механизма формирования стружки в хрупкий и обратно.

3. «Обтекание» режущей кромки обрабатываемым материалом предопределяет формирование обработанной поверхности как след профиля режущей кромки, копирование ее погрешностей (внутренних и внешних). Следовательно, свой вклад в формирование поверхности вносят практически все нанообъекты системы нанорезания.

*Если не будешь утруждать ум
пустяками, всякое время ста-
нет прекрасной порой.*

*Из древней китайской
мудрости*

Тема 11

СИЛЫ РЕЗАНИЯ, ТЕМПЕРАТУРА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ МИКРО- И НАНОРЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

План:

11.1. Силы резания в нанометрическом диапазоне.

11.2. Напряжения в процессе нанорезания.

11.3. Определение температуры нанорезания.

Заключение.

11.1. Силы резания в нанометрическом диапазоне

С точки зрения атомной структуры нанообъектов «режущий инструмент–заготовка» сила резания – это сумма всех сил, действующих в пределах контакта между атомами заготовки и атомами материала режущего инструмента. Эти силы определяют удельную энергию процесса, которая является характеристикой сопротивления материала резанию.

С целью описания силового взаимодействия между алмазным инструментом и заготовкой из монокристалла кремния были проведены исследования методом MD моделирования сил резания, температуры и напряжений. В табл. 11.1 приведены значения количества атомов, радиус округления, толщина среза и др.

Силы резания рассчитывались как реакции сил, действующих на инструмент во время контакта его с атомами заготовки. Поскольку характер атомного взаимодействия динамический с большим числом степеней свободы, то мгновенные силы сильно колеблются. С этой целью расчеты велись по большому количеству атомов (сотни тысяч шагов), что сглаживает колебание получаемых результатов.

На рис. 11.1 приведены результаты, полученные моделированием и в ходе экспериментов, которые указывают на линейную зависимость сил реза-

ния на единицу длины кромки с ростом толщины срезаемого слоя и уменьшение при этом удельной энергии нанорезания.

Таблица 11.1 – Характеристики процесса, использованные в модели MD нанорезания кремния

Обрабатываемый материал	монокристалл кремния
Инструментальный материал	алмаз
Количество атомов в инструменте и заготовке	6440 и 36657
Радиус округления режущей кромки, ρ , нм	1,263
Толщина срезаемого слоя, a , нм	1,263
Обрабатываемая поверхность кристалла кремния	010 и 111
Направление резания (траектория)	$\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$
Передний угол, γ , град.	-25
Задний угол, α , град.	10
Температура, К	300
Скорость резания, м/с	100
Временной шаг, фемтосекунда	1
Программное обеспечение	LAMMPS – крупномасштабная атомно-молекулярная массивно-параллельная симуляция

Наблюдающиеся расхождения расчетных и экспериментальных значений сил объясняют различием величины радиусов округления режущей кромки в эксперименте и при моделировании. Это еще раз подтверждает чрезвычайно важную роль радиуса округления.

Малые силы резания на единицу длины кромки являются характеристикой нанорезания, одновременно, как и рост удельной энергии с уменьшением толщины срезаемого слоя. Одним из факторов, повышающих удельную энергию, является передний угол. Для малых толщин срезаемого слоя эффективным является отрицательный передний угол, что приводит к возрастанию удельной энергии. Это подтверждается данными, приведенными в табл. 11.2.

Моделированием выявлено изменение составляющих сил резания в продолжительности нескольких временных шагов (несколько фемтосекунд), связь сил резания с толщиной среза, кристаллографической ориентацией кри-

сталла кремния. В условиях нанорезания выбор кристаллической ориентации (табл. 11.3) становится определяющим особенно в сочетании с таким высоко-анизотропным материалом как, например, алмазом (рис. 11.2).

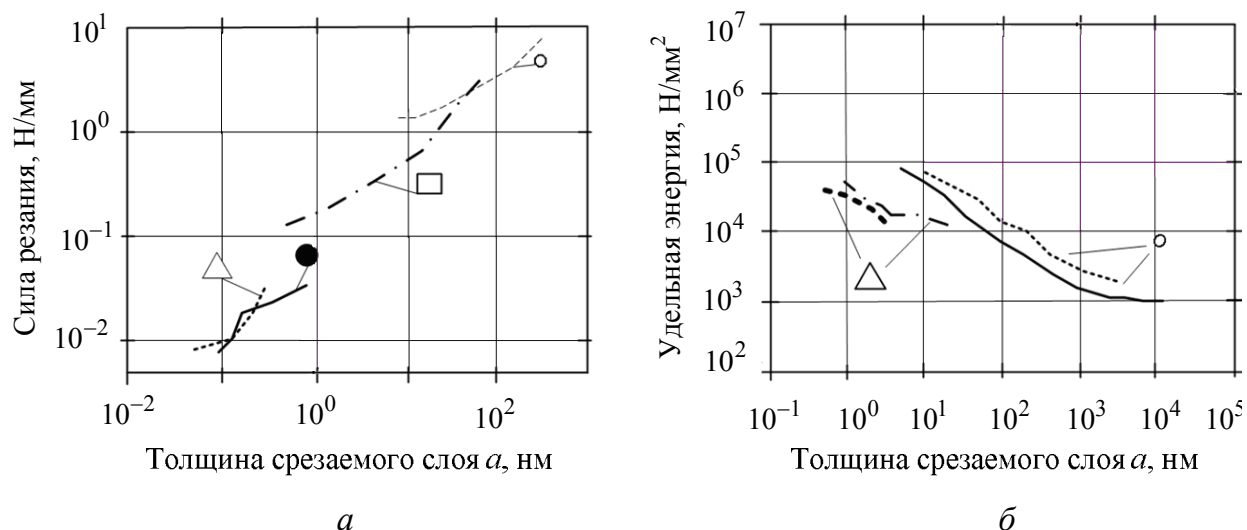


Рисунок 11.1 – Влияние толщины срезаемого слоя на силу, отнесенную к единице длины кромки (*а*), и удельную энергию (*б*) нанорезания:

- а* – ● моделирование σ ($\rho = 0,5$ нм);
 △ моделирование σ ($\rho = 5,0$ нм);
 ○ измеренное ($\rho = 50$ нм);
 □ рассчитанное ($\rho = 10$ нм)
- б* – ○ – эксперимент;
 — ○ – эксперимент;
 — · △ – моделирование;
 - - - △ – моделирование

Таблица 11.2 – Разрушение и энергетические затраты при обработке материалов в различных размерных диапазонах

Параметры	Диапазон		
	1 нм–0,1 мкм	0,1 мкм–10 мкм	10 мкм–1 мм
Вид дефектов	точечный	дислокации	трещины, границы зерен
Стружка	группы атомов	части кристаллов	поликристаллы
Энергия разрушения хрупких материалов	10 ⁴ –10 ³ дж/м ³ межатомные трещины	10 ³ –10 ² дж/м ³ микротрещины	10 ² –10 дж/м ³ хрупкие трещины
Энергия разрушения пластичных материалов	10 ⁴ –10 ³ дж/м ³ атомные перемещения	10 ³ –10 ² дж/м ³ перемещение скольжения	10 ² –10 дж/м ³ деформации сдвига

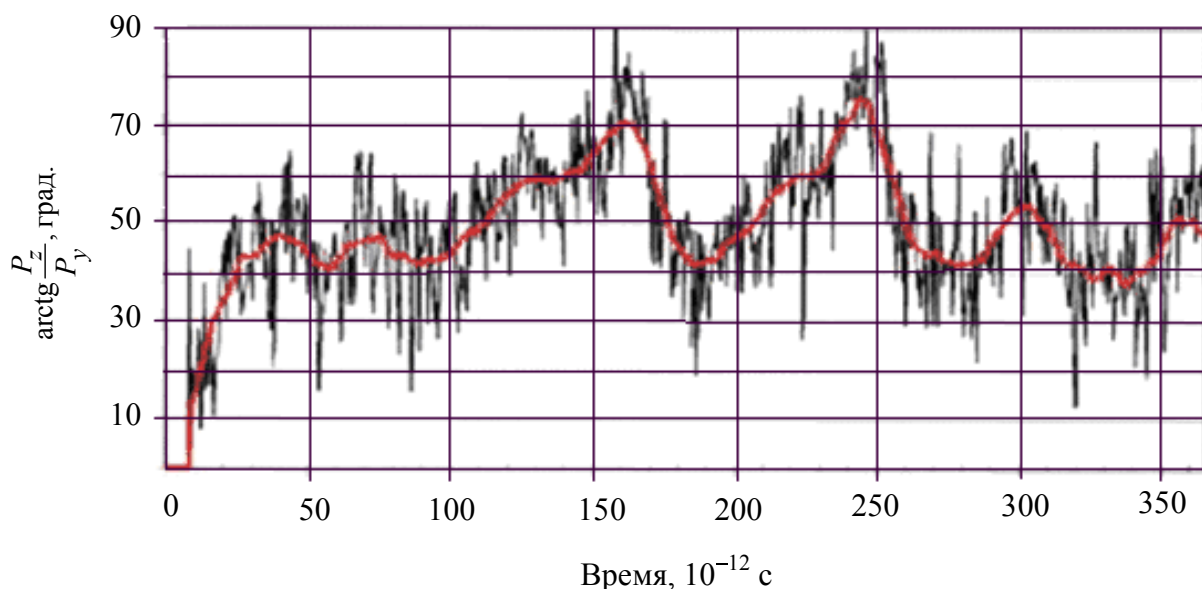


Рисунок 11.2 – Траектория изменения отношения сил резания $\frac{P_z}{P_y}$

Из табл. 11.3 следует, что наибольшее соотношение составляющих силы резания $\frac{P_z}{P_y}$ характерно для обработки плоскости $\{111\}$ кристалла кремния в сочетании с додекаэдрической $\langle -110 \rangle$ ориентацией алмазного инструмента. Именно для этих сочетаний кристаллографической ориентации установлена наименьшая энергоёмкость процесса алмазного нанорезания таких хрупких кристаллов, как кремний.

Таблица 11.3 – Сочетания кристаллографической ориентации материалов обрабатываемого и инструментального

№ п/п	Ориентация обрабатываемого кристалла кремния	Направление резания	Ориентация алмазного кристалла	Соотношение составляющих силы резания
1	$\{111\}$	$\langle -110 \rangle$	кубическая	минимальное
2	$\{010\}$	$\langle 100 \rangle$	кубическая	скачкообразное
3	$\{111\}$	$\langle -110 \rangle$	додекаэдрическая	максимальное

11.2. Напряжения при нанорезании

Как уже указывалось, при возникновении физического контакта алмаза и кремния в последнем из-за значительного сжатия атомной решетки возни-

кают большие местные напряжения в кристаллической структуре кремния, приводящие к фазовым изменениям от кубической к объемно-центрированной тетрагональной, прежде всего, в зоне действия вершины режущего клина резца.

Напряжения, которые скачкообразно изменяются в интервалах времени, измеряемого в фемтосекундах, целесообразно рассматривать в слоях ньютоновских атомов.

Взаимодействие нанообъектов системы нанорезания формируют поле напряжений, которые в значительной степени зависят от процесса хрупкого или пластического стружкообразования (рис. 11.3).

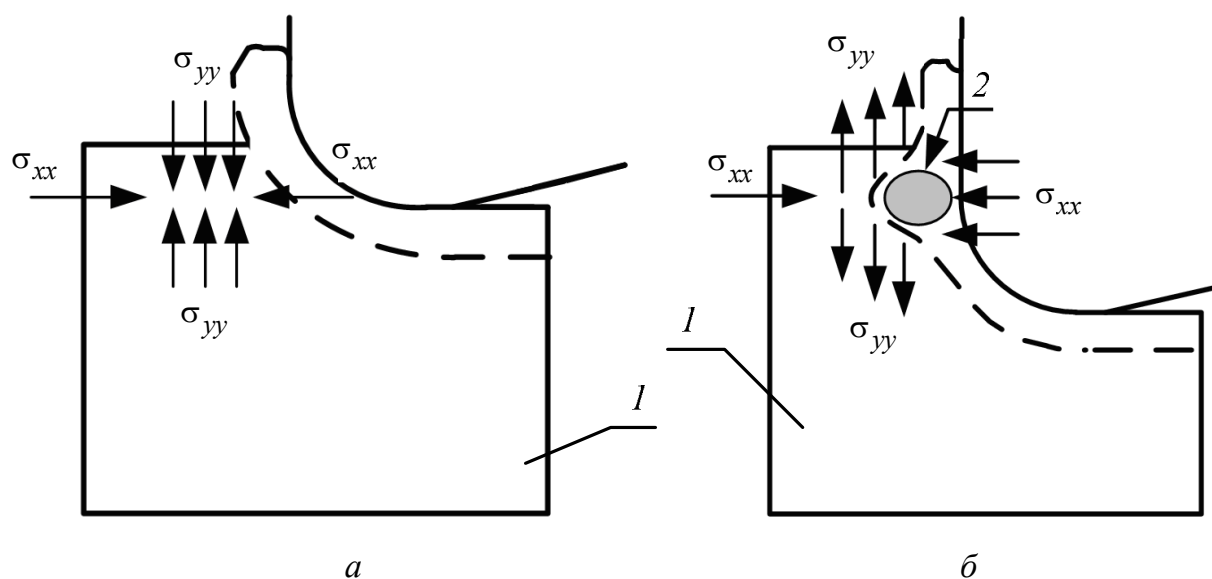


Рисунок 11.3– Схема действия напряжений для разных режимов стружкообразования:

а – пластический режим; *б* – хрупкий режим;
1 – заготовка; *2* – пик зоны деформации

Характер изменения тангенциальных σ_{xx} и нормальных σ_{yy} напряжений отличается в зависимости от схемы стружкообразования в соответствии с временными (фемтосекунды) шагами (рис. 11.4).

При постоянном значении радиуса округления кромки $\rho = 4$ нм увеличение толщины срезаемого слоя $a = 3,2$ нм, $a = 4,0$ нм, $a = 4,5$ нм не влияет на характер напряжений σ_{xx} , которые всегда оставались сжимающими. Однако, в направлении перпендикулярном направлению трещинообразования, напряжения σ_{yy} уменьшались (толщина срезаемого слоя возросла), переходя в растягивающие, что интенсифицирует трещинообразование.

В условиях реализации механизма пластического нанорезания кремния зарегистрированы чрезвычайно высокие сжимающие гидростатические напряжения в зоне стружкообразования, что в сочетании с температурой порождает фазовый переход от кристаллического к аморфному состоянию и способствует повышению пластичности материала. Очевидно, что в случае нанорезания кремния напряжения сдвига должны быть больше напряжений пластического течения материала путем распространения дислокаций. Приведенная на рис. 11.5 картина позволяет определить места концентрации напряжений, степень влияния наноструктуры на это распределение и на процесс снятия материала. Можно прогнозировать места возникновения дислокаций, т. к. области с высокими напряжениями сдвига являются потенциальными источниками их зарождения и движения.

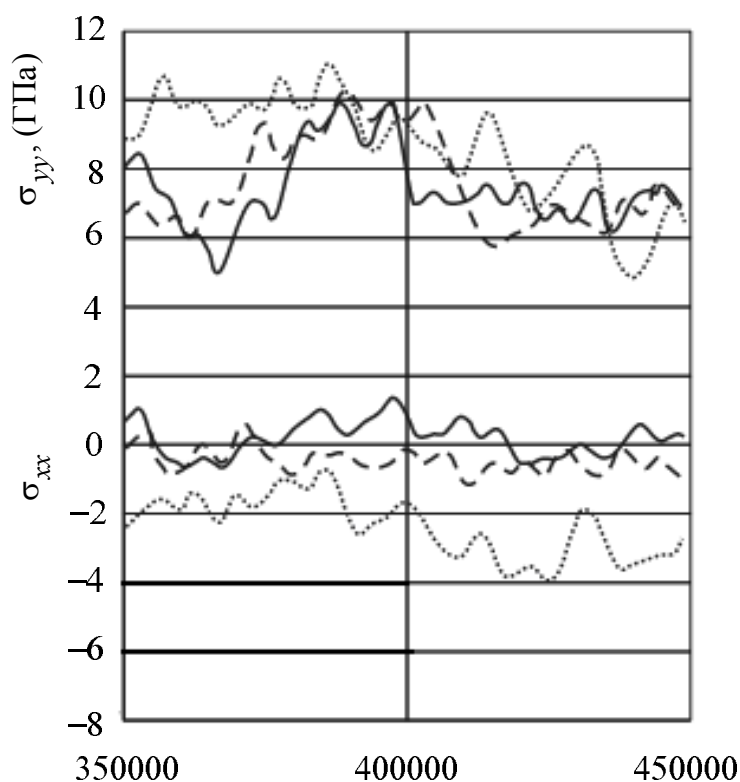


Рисунок 11.4– Изменение нормальных и касательных напряжений в зависимости от толщины срезаемого слоя при радиусе округления лезвия $\rho = 4$ нм:

- $a = 3,2$ нм;
- - - $a = 4,0$ нм;
- $a = 4,5$ нм

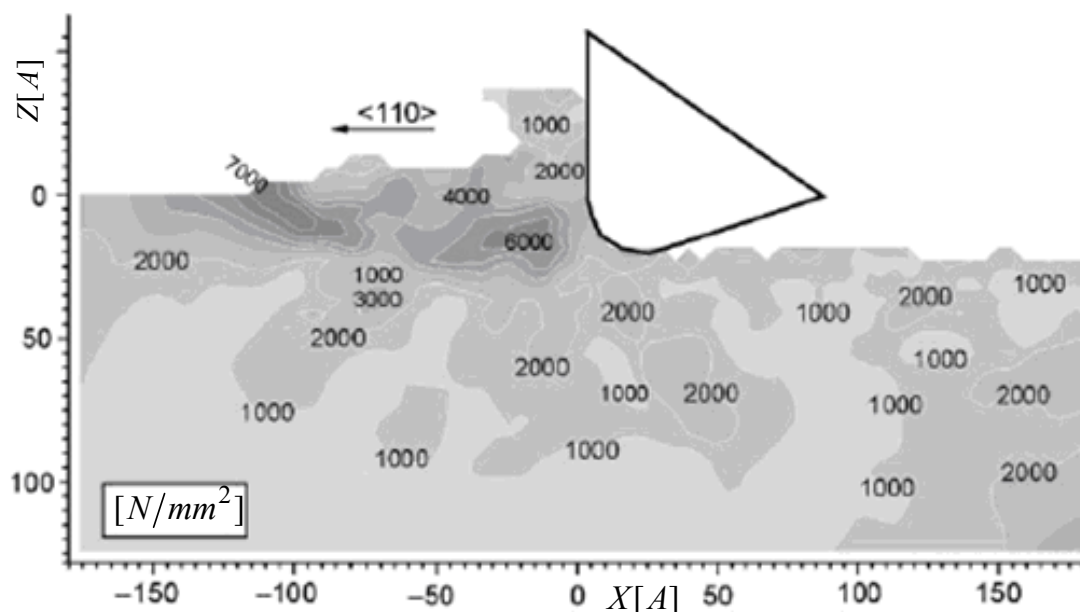


Рисунок 11.5 – Распределение напряжений сдвига в 3D модели MD ортогонального нанорезания

11.3. Определение температуры нанорезания

Моделирование методом MD указывает на приблизительно концентрическое распределение температуры в области вершины режущего клина и далее в области сдвига (рис. 11.6). При этом инструмент действует как термический изолятор, поддерживающий баланс тепла в стружке.

Самая высокая температура при молекулярно-динамическом MD моделировании наблюдается на режущей кромке. Именно на режущей кромке происходят деформационные сдвиги материала заготовки, которые переводят потенциальную энергию в кинетическую. Большую роль в тепловых процессах играет износ алмазного инструмента.

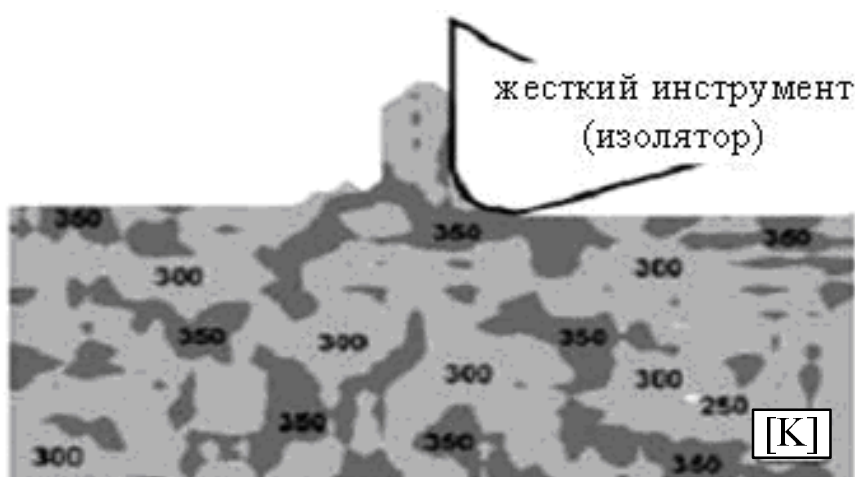
При MD моделировании, определяя температуры нанорезания, исходят из допущения, что энергия резания полностью переходит в теплоту, что и предопределяет рост температуры и кинетической энергии. Кинетическую энергию системы можно подсчитать по формуле:

$$E_k = \frac{3}{2} N K_B T = \frac{\sum m_i (V_i^2)}{2},$$

где E_k – среднее значение кинетической энергии в состоянии равновесия;
 K_B – постоянная Больцмана; T – температура; m_i – масса i -го атома;
 V_i – скорость i -го атома; N – количество атомов.

После этого температуру можно подсчитать по формуле:

$$T = \frac{2E_k}{3NK_B}$$



a



б

Рисунок 11.6 – Распределение температур при MD моделировании
 ортогонального нанорезания:
a – жидкость 300 К; *б* – без жидкости

Моделирование выявило максимум температуры нанорезания (до 900 К) в первичной зоне сдвигов в области режущей кромки (рис. 11.7). Особенность снятия микростружек характерна тем, что температуры на задней поверхности оказываются больше, чем на передней. Это означает, что между задней и передней поверхностями инструмента существует температурный градиент. Более высокий уровень температуры на задней поверхности является причиной более интенсивного износа по задней поверхности инструмента.

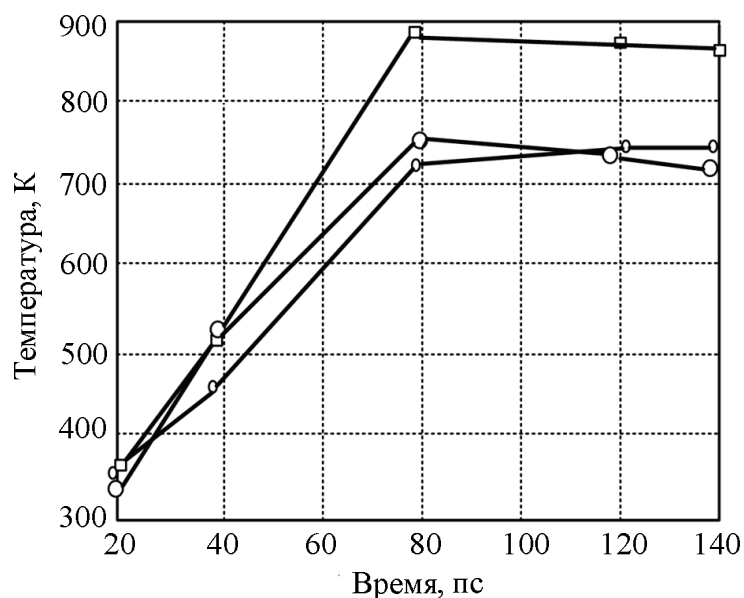


Рисунок 11.7 – Распределения температуры резания в режущем инструменте при нанорезании ($V = 20$ м/с, $a = 1,5$ нм, $\rho = 1,57$ нм):

- – режущая кромка;
- – передняя поверхность;
- – боковая поверхность

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Непосредственный контакт атомов материала заготовки и режущего клина определяет силы резания как сумму сил на всех элементарных участках, т. е. уровень сопротивления обрабатываемого материала нанорезанию.

При MD моделировании исследуется взаимодействие десятков тысяч атомов (возможно моделировать и другие частицы), при этом стремятся ог-

раничить зоны этого воздействия несколькими атомными приповерхностными слоями. Обнаружена линейная зависимость сил нанорезания на единицу длины участка контакта кромки от толщины срезаемого слоя. С ее увеличением силы резания растут, а удельная энергия снижается. Это является характерной особенностью нанорезания.

Для малых толщин срезаемого слоя необходимо назначать отрицательный передний угол, что также повышает удельную энергию.

2. При микро- и нанорезании наблюдается различие характеристик процесса резания для различных величин размерных нанодиапазонов. Например, в диапазоне 1 нм–0,1 мкм энергия разрушения больше на два порядка, чем в диапазоне 0,1 мкм–10 мкм, и на 3–4 порядка – чем в диапазоне 10 мкм–1 мм для хрупких материалов. На энергию разрушения большое влияние оказывает и кристаллографическая ориентация обрабатываемого кристалла и алмазного кристалла резца.

3. В продолжение физического контакта алмаза (режущий клин) и хрупкого кристалла (например, кремния) из-за сжатия под действием сил резания атомная решетка последнего деформируется, возникают большие локальные напряжения, особенно в области вершины режущего клина. Это приводит к фазовым изменениям от кубической решетки к объемно-центрированной ортогональной, т. е. к аморфному состоянию, «пластифицируют» обрабатываемый хрупкий материал. При этом напряжения сдвига больше напряжения пластического течения материала по дислокационным механизмам.

4. Температура резания в нанодиапазоне достигает максимума у вершины режущего клина. При моделировании допускается, что энергия резания полностью переходит в теплоту, которая распространяется приблизительно концентрически. Тем не менее, температура на задней поверхности оказывается выше, чем на передней. Наличие такого градиента является причиной более интенсивного износа по задней поверхности инструмента.

*Никто не может научиться
таланту, уму, смелости,
решительности, святости.*

*Из древней китайской
мудрости*

Тема 12

УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ МИКРО- И НАНОШЛИФОВАНИЯ

План:

- 12.1. Общая характеристика процесса микро- и nanoшлифования.
 - 12.2. Классификация процесса микро- и nanoшлифования.
 - 12.3. Условия перехода от хрупкого к пластическому режиму микро- и nanoшлифования.
 - 12.4. Влияние условий резания на съем материала.
 - 12.5. Качество обработанной поверхности.
- Заключение.

12.1. Общая характеристика процесса микро- и nanoшлифования

Микро- и nanoшлифование является динамической областью исследований, где применяются различные методы и проверяются технологические концепции. Nanoшлифование, прежде всего, используется для создания высококачественных функциональных элементов, обычно из труднообрабатываемых материалов. Целью процессов микро- и nanoшлифования является создание элементов с высоким качеством финишных поверхностей, высокой точностью формы и чистотой поверхностей также, как это достигается при наноточении пластических материалов алмазным инструментом.

Основное применение nanoшлифование нашло в полупроводниковой промышленности, например, изготовление кремниевых пластинок диаметром 300 мм, и оптической промышленности, например, обработка оптических линз, форм из закаленной стали и керамики для воссоздания стеклянных линз, сенсоров, объективов камер, а также микроэлектронной, астрономической, автомобильной и других отраслях.

Несмотря на то, что термин *наношлифование* до сих пор точно не определен, этот процесс имеет характерные признаки, отличающие его от других видов обработки. *Наношлифование – это процесс удаления материала:*

- *инструментом с фиксированными абразивами (в отличие от доводки и полирования);*
- *имеющий прерывистый контакт с поверхностью заготовки (в отличие от хонингования);*
- *где абразивная поверхность характеризуется хотя бы одним статистическим параметром распределения (чтобы исключить фрезерование, но применить шлифование специализированными кругами).*

Физическая сущность процесса наношлифования должна быть определена, как и для других видов нанообработки. *Допуски на отклонение размеров формы и требуемая шероховатость должны обеспечиваться за одну операцию во избежание повторной обработки и дополнительной проверки.* Это условие является наиболее сложной задачей для наношлифования, поскольку оно может быть реализовано только на специальных станках с высокой жесткостью и инструментами, которые существенно не изнашиваются (или изнашиваются прогнозируемым образом) во время операции. В ближайшем будущем наношлифование заменит множество традиционных процессов обработки – тонкое шлифование, доводку и полирование, которые, в некоторых случаях, делают продукцию очень трудоемкой и дорогостоящей.

12.2. Классификация процессов микро- и наношлифования

Была предложена классификация микро- и наношлифования в сравнении с полированием и традиционным шлифованием, которая основывается на удельном коэффициенте удаления материала Q'_w и величине зерна d_3 (рис. 12.1). Удельный коэффициент удаления материала показывает, сколько кубических миллиметров материала может быть удалено шлифовальным кругом шириной 1 мм за 1 секунду. Поскольку коэффициент всегда относится к единице ширины круга и единице времени, то непосредственное сравнение производительности может выполняться между различными типами шлифовальных кругов и шлифовальных процессов.

Этот процесс базируется на механизмах снятия материала, находящихся на границе перехода от хрупкого (с трещинами и вырывами на материале) до пластического (без или с небольшими приповерхностными повреждениями на материале заготовки) режима стружкообразования. *Наношлифование –*

это абразивный процесс, выбор которого во многом зависит от обрабатываемого материала.

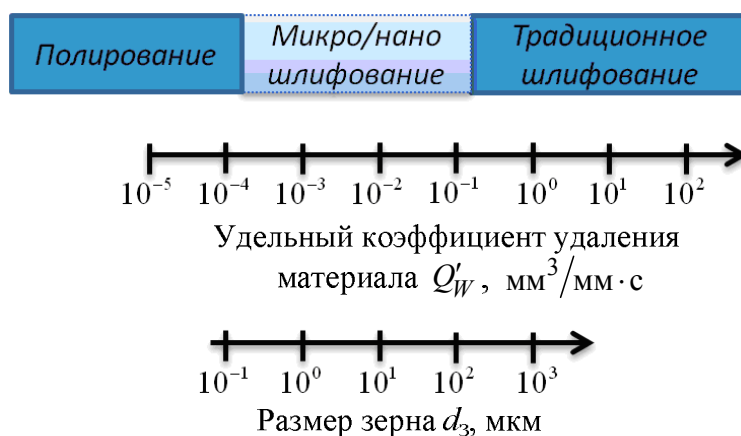


Рисунок 12.1 – Классификация микро- и наношлифования

Рис. 12.2 показывает, что мягкие материалы, в основном, обрабатываются при помощи процессов лезвийного резания. Эти процессы достаточно хорошо изучены, понятны и близки к тому, чтобы быть определенными.

Материал	Мягкий	Твердый		
Удаление материала	Резание (пластический режим)		Абразивная обработка (пластический/хрупкий режим)	
Процесс обработки	Традиционная обработка Фрезерование Точение	Нанообработка Нанофрезерование Наноточение	Традиционная обработка Шлифование Хонингование	Нанообработка Наношлифование Доводка Полирование

Рисунок 12.2 – Классификация нанообработки, зависящая от материала, механизма удаления материала и вида обработки

Характеристика процесса наношлифования критериями качества не исчерпывается. Снятие материала осуществляется с глубиной резания в субмикрометрическом диапазоне, часто в пластическом режиме, с чрезвычайно малой подачей, малым удельным коэффициентом удаления материала и скоростью резания до 30 м/с (рис. 12.3).

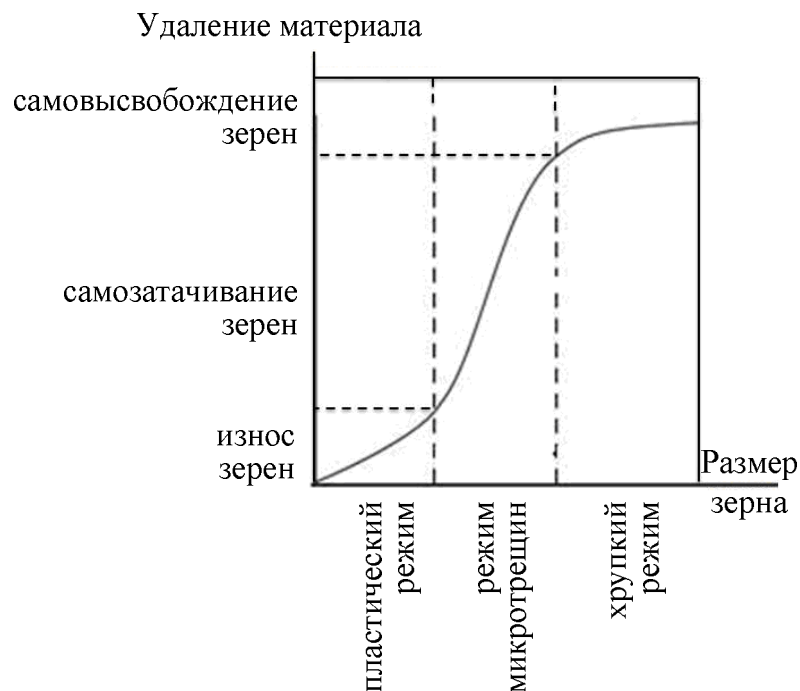


Рисунок 12.3 – Режимы удаления материала и износа круга

12.3. Условия перехода от хрупкого к пластическому режиму микро- и наношлифования

Для того, чтобы достичь полностью пластического режима наношлифования, удаление материала должно происходить в нанометрическом диапазоне. Обычно при наношлифовании твердых и хрупких материалов возникают микротрещины, которые ухудшают качество поверхностного слоя. Переход от хрупкого к пластическому режиму удаления материала очень важен для реализации потенциала процесса наношлифования. Пластическая обработка твердых и хрупких материалов – это сложное взаимодействие между геометрией режущего инструмента, параметрами процесса и реакцией материала.

Из теории пластичности известно, что степень пластической деформации зависит от температуры, скорости деформации, а также многоосевых сжимающих и растягивающих напряжений в обрабатываемом материале. *Наиболее важным параметром для реализации перехода от хрупкого к пластическому режиму стружкообразования является напряженное состояние в обрабатываемом материале в области, прилегающей к режущей кромке.*

Рис. 12.4 иллюстрирует гипотезу Кулона-Мора, которая описывает многоосевые сжимающие и растягивающие напряжения в кристаллите и

пластическая обработка ← пластическая деформация

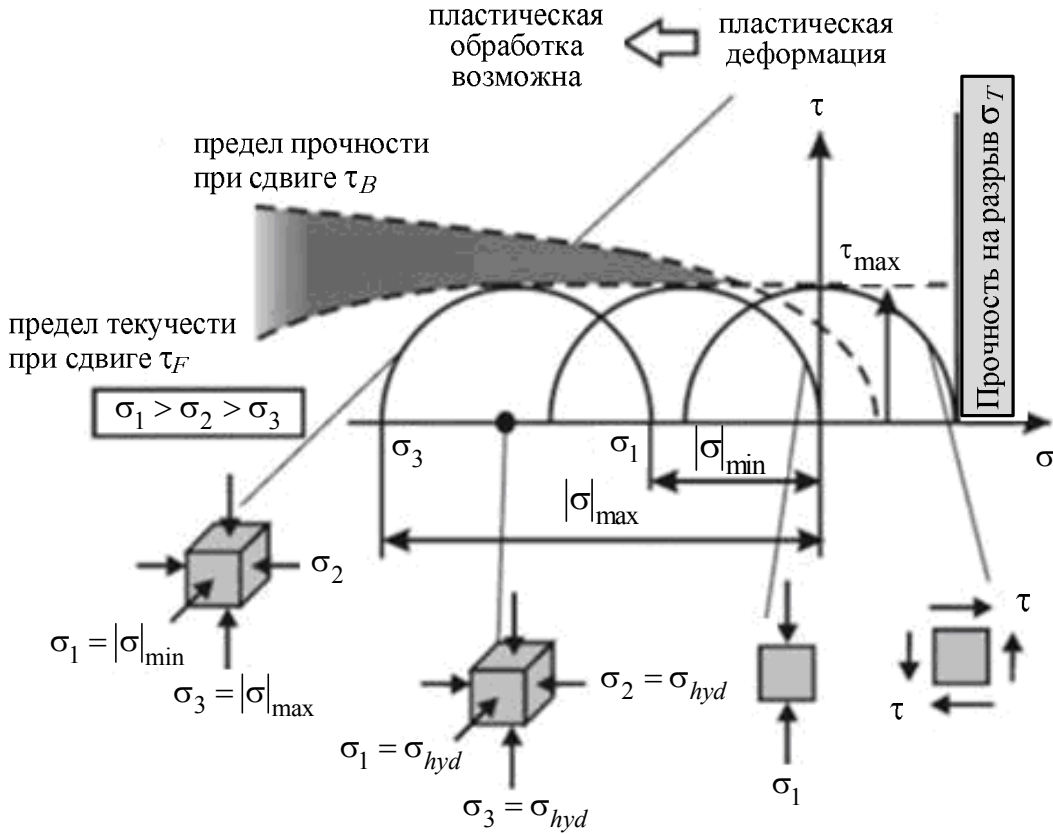


Рисунок 12.4 – Влияние напряжений на предел прочности при сдвиге τ_B , предел текучести при сдвиге τ_F и пластическую деформацию труднообрабатываемых материалов

Рис. 12.5 представляет пример царапин от единичного зерна на монокристалле кремния. При атмосферном давлении царапины на материале демонстрируют только хрупкое поведение, а царапины под давлением 200 МПа были получены в пластическом режиме лишь с незначительными признаками хрупкого разрушения обрабатываемого материала. Это происходит вместе с увеличением критической глубины резания от ~ 50 нм при атмосферном давлении до ~ 850 нм под гидростатическим давлением 200 МПа. Пластического режима обработки также можно достичь, используя инструменты с отри-

цательным передним углом при нанорезании и связанные абразивы при на-
ношлифовании. *Из-за отрицательного переднего угла во время трения ин-
струмента об обрабатываемый материал выделение тепла в материале
возрастает. Следовательно, в таком состоянии материал может быть об-
работан в пластическом режиме* (рис. 12.5, 12.6).

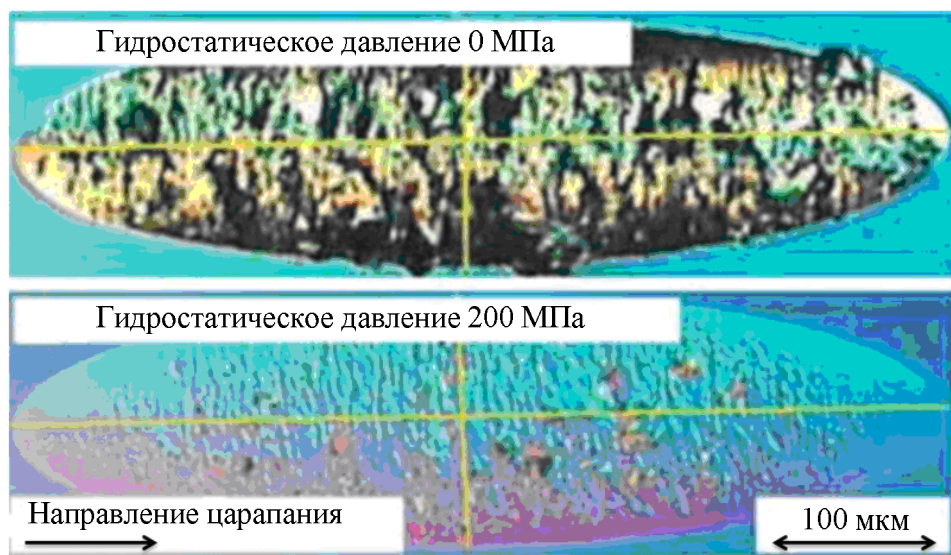


Рисунок 12.5 – Изображение царапин на кремнии, созданных единичным зерном при атмосферном и гидростатическом давлении 200 МПа: материал заготовки – монокристалл кремния; ориентация поверхности – $\{111\}$ –плоскость; направление царапания – $\langle 221 \rangle$ –плоскость; передний угол инструмента – $\gamma = -45^\circ$; скорость резания – $V = 0,4$ м/с; рабочая среда под давлением – минеральное масло

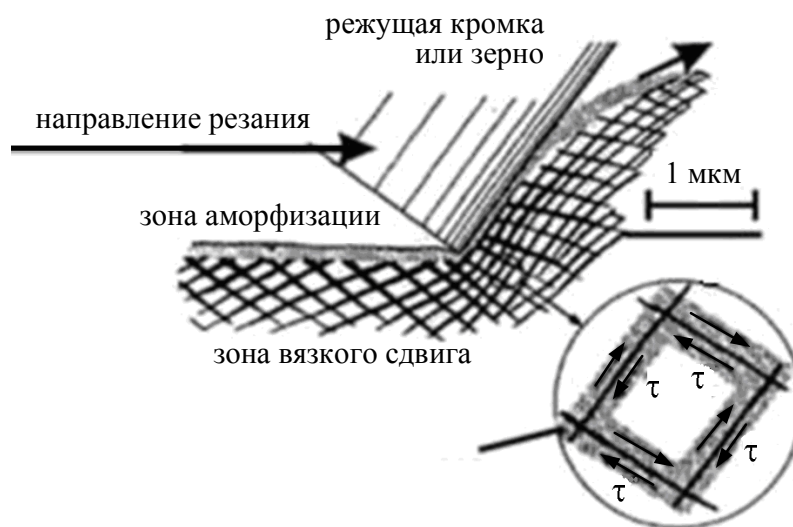


Рисунок 12.6 – Поперечное сечение зоны резания при обработке стекла

12.4. Влияние условий нанорезания на сьем материала

Механизм удаления материала при микрошлифовании сильно зависит от глубины резания. Эта зависимость была подтверждена многими исследованиями. Контакт абразивов с обрабатываемой поверхностью приводит к упругой реакции материалов и с дальнейшим увеличением глубины резания к пластическому поведению. Сначала создается микронаклеп и микроврезание (рис. 12.7 а, б). Такой тип взаимодействия определяется радиусом округления вершины зерна ρ и в целом его геометрией. Это приводит к побочной деформации и сжатию материала в направлении резания. Увеличение глубины резания приводит к микрорезанию (рис. 12.7 в). Дальнейшее увеличение глубины резания приводит к возникновению микротрещин в приповерхностном слое обрабатываемого материала (рис. 12.7 г).

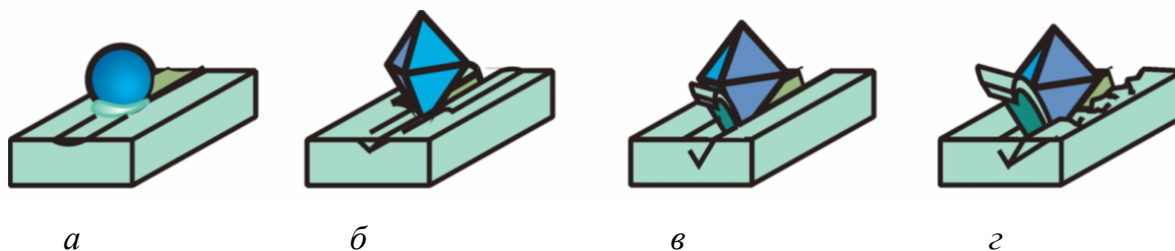


Рисунок 12.7 – Механизм удаления материала при микрошлифовании

Было показано, что создание гидростатического давления и поддержание критической толщины стружки являются предпосылками для микрошлифования труднообрабатываемых материалов без трещин. Пластическое микрошлифование без повреждения труднообрабатываемых материалов требует максимальной толщины среза, которая, однако, не превышает критическую толщину среза для конкретного материала. Эти результаты были подтверждены при исследовании резания единичным зерном.

12.5. Качество обработанной поверхности

Качество обработанных поверхностей после микрошлифования оценивается по 4 критериям:

- размерная точность;
- макро отклонения поверхности (скалывание кромок, трещины);

- микро отклонения поверхности (царапины, шероховатость, следы обработки);
- состояние материала приповерхностного слоя (глубина приповерхностных повреждений, нежелательные примеси, наклеп, остаточные напряжения, фазово-структурные изменения).

Качество объектов и механические свойства обрабатываемого материала выступают в роли исходных данных для характеристики и предопределяют выбор абразивного процесса (рис. 12.8). В зависимости от требований к качеству и свойствам материала должен быть определен вид обработки, используемые инструменты, выдержаны требования к станку и окружающей технологической среде. В идеальном случае при nanoшлифовании все составляющие системы нанорезания должны иметь характеристику nanoобъекта.



Рисунок 12.8 – Характеристика nanoшлифования

В связи с тем, что глубина резания и толщина стружки при nanoшлифовании чрезвычайно малы, шлифовальные круги не самозатачиваются.

В экспериментах было показано, что при nanoшлифовании полупроводниковой пластины в хрупком режиме стружкообразования существует 4 зоны приповерхностных повреждений: зона мелкокристаллического состояния материала, зона трещин, переходная зона и зона упругой деформации (рис. 12.9 а). При nanoшлифовании в пластическом режиме приповерхностный слой может быть разделен на 4 зоны: зона аморфного состояния материала, зона мелкокристаллического состояния материала, переходная зона и зона упругой деформации (рис. 12.9 б). Самая верхняя зона I аморфного материала формируется независимо от того, поддавалась она наноточению или nanoшлифованию. Этот слой может быть толщиной до 200 нм, что зависит от особенностей процесса, применяемых инструментов и параметров процесса.

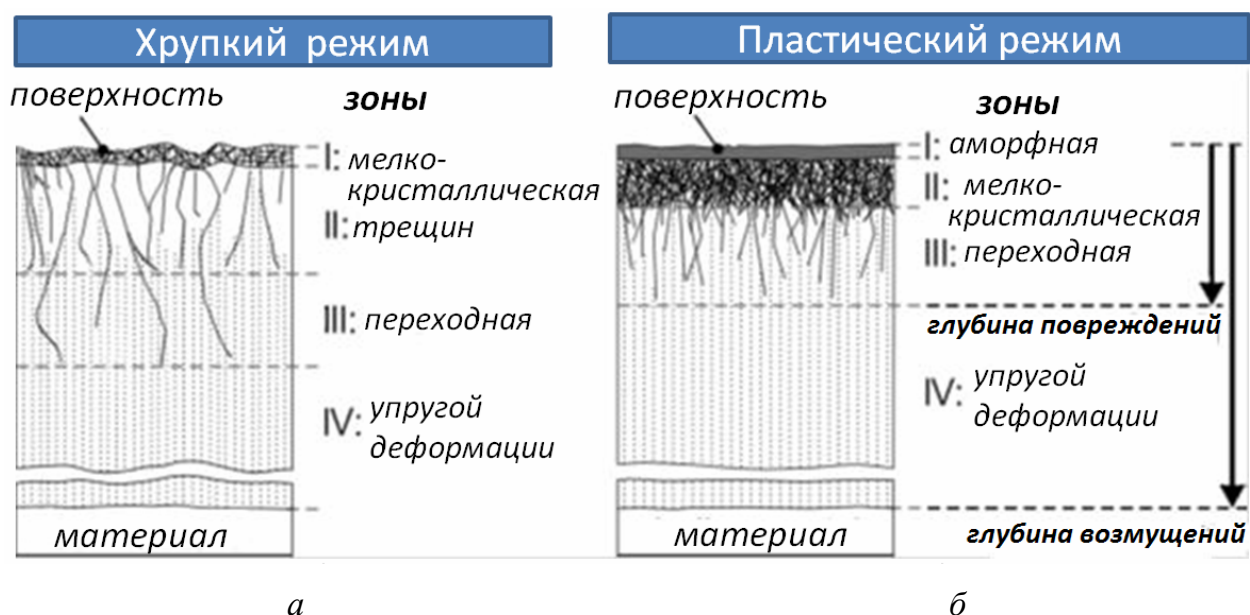


Рисунок 12.9 – Структура приповерхностного слоя при хрупком и пластическом режимах nanoшлифования

Закключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Назначение процессов микро- и нанорезания – создание элементов конструкций с высоким качеством финишных поверхностей, с высокой точностью так же, как это достигается при наноточении пластических материалом алмазным инструментом. Вскоре nanoшлифование заменит тонкое шли-

фование, доводку, полирование и реализует возможности однократной обработки.

2. Наношлифование рассматривают как такой процесс удаления материала, который осуществляется инструментом с фиксированными (закрепленными) абразивами, имеющим прерывистый контакт и характеризующимся хотя бы одним статистическим параметром распределения.

3. Четких границ между микро- и нанорезанием не установлено. Для классификации микро- и наношлифования можно использовать удельный коэффициент удаления материала, определяемый объемом материала, снятого кругом шириной 1 мм за одну секунду.

4. Переход от хрупкого к пластическому режиму удаления материала позволяет реализовать потенциал резания в нанометрическом диапазоне. Наиболее важным параметром для реализации возможностей перехода от хрупкого к пластичному режиму стружкообразования является степень напряженного состояния в обрабатываемом материале в области, прилегающей к активному участку режущей кромки. Пластический режим реализуется, если гидростатическое сжатие и напряжение сдвига будут достаточно высокими. Этому способствует и тепловыделение в зоне резания и глубина резания (толщина среза).

5. Качество обработанных поверхностей оценивается по размерной точности, макроотклонению, микроотклонению, состоянию материала приповерхностного слоя, остаточного напряжения, фазово-структурным изменениям. В идеальном случае высокое качество обеспечивается тогда, когда все составляющие системы нанорезания являются нанообъектами.

6. При наношлифовании в пластическом режиме приповерхностный слой состоит из 4-х зон: зона аморфного состояния, зона микрокристаллического состояния, переходная зона и зона упругой деформации.

7. В связи с тем, что глубина резания и толщина стружки при наношлифовании чрезвычайно малы, шлифовальные круги не самозатачиваются.

*В науке нет другого способа
приобретения, как в поте лица:
ни порывы, ни фантазии, ни
стремления всем сердцем не
заменяют труда.*

А. Герцен

Тема 13

РОЛЬ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МИКРО- И НАНОШЛИФОВАНИЯ

План:

13.1. Классификация абразивных инструментов, применяемых для микро- и наношлифования.

13.2. Влияние абразивных зерен на процесс микро- и наношлифования.

13.3. Роль связки в реализации процесса шлифования в нанометрическом диапазоне.

Заключение.

13.1. Классификация абразивных инструментов, применяемых для микро- и наношлифования

Абразивные круги, которые используются в наношлифовании, имеют различную конструкцию, например, круги с определенным или неопределенным расположением абразивных зерен. Обычно диаметр шлифовальных кругов находится в диапазоне от 50 до 400 мм, а размер зерен колеблется от мелкозернистых ($\sim 0,125$ мкм) до крупнозернистых (~ 200 мкм).

Шлифовальные круги с неопределенным распределением зерен являются наиболее обычным типом, где абразивы связаны по периметру круга. Также существуют инструменты для наношлифования с четко определенным расположением абразивов, например, круги с однослойным абразивным электролитическим покрытием. Было продемонстрировано *преимущества наношлифования оптического стекла чашечными кругами с четко определенным расположением зерен*. Чашечные круги с заданным расположением абразивных зерен используются для создания чрезвычайно ровных поверх-

ностей, например, для nanoшлифования полупроводниковых пластин (рис. 13.1) и зеркал.



Рисунок 13.1 – Чашечный круг и кремниевая пластина диаметром 300 мм и толщиной 5 мкм

В исследованиях показано, что крупнозернистые nanoшлифовальные круги с размером зерен 91 мкм, 151 мкм и 181 мкм способны формировать шероховатость поверхностей стекла в нанометрическом диапазоне. Здесь однослойные алмазные круги с электролитическим покрытием предварительно подвергались специально разработанному процессу управления профилем и рельефом рабочей поверхности, имеют уплощенные вершины алмазных зерен и равномерную абразивную топографию. Последующие nanoшлифовальные эксперименты показали, что крупнозернистые алмазные nanoшлифовальные круги в сочетании с низким удельным коэффициентом удаления материала Q'_W образовали шероховатость поверхности $R_a < 20$ нм.

В некоторых случаях для минимизации отвода тепла в заготовку и улучшения условий охлаждения используются nanoшлифовальные круги с канавками. Такие круги имеют глубокие каналы в абразивном слое или состоят из абразивных сегментов, объединенных в круг.

Спрос на макроизделия со свойствами и структурой на микро- и наноуровнях непрерывно растет, представляя новые проблемы для технологии производства. Обработка микроструктур из труднообрабатываемых материалов достигается только микро- и nanoшлифованием. *Операции микро- и nanoшлифования отличаются от других процессов своей высокой гибкостью, поэтому они подходят для мелкосерийного производства и особенно для производства микроформ.*

Для производства микроструктурированных объектов, которые имеют параметры качества обработанной поверхности на наноуровне и условия реализации обработки в нанодиапазоне, существует два метода с различной формой инструмента, а именно, периферийные шлифовальные микрокруги для обработки непрерывных структур (например, массивы пирамидок) и пальцевые инструменты типа микрокарандаша для обработки прерывистых структур (рис. 13.2–13.4).

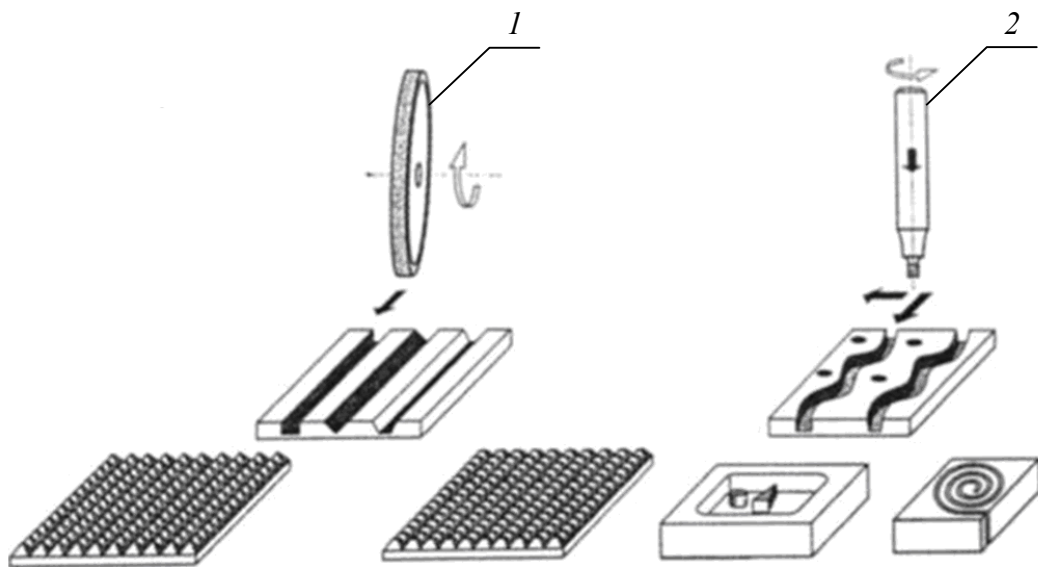


Рисунок 13.2 – Процессы микроструктурирования и шлифовальные микроинструменты:

1 – периферийный шлифовальный круг ($b_s < 1$ мм); 2 – микрокарандаш ($\varnothing < 1$ мм)

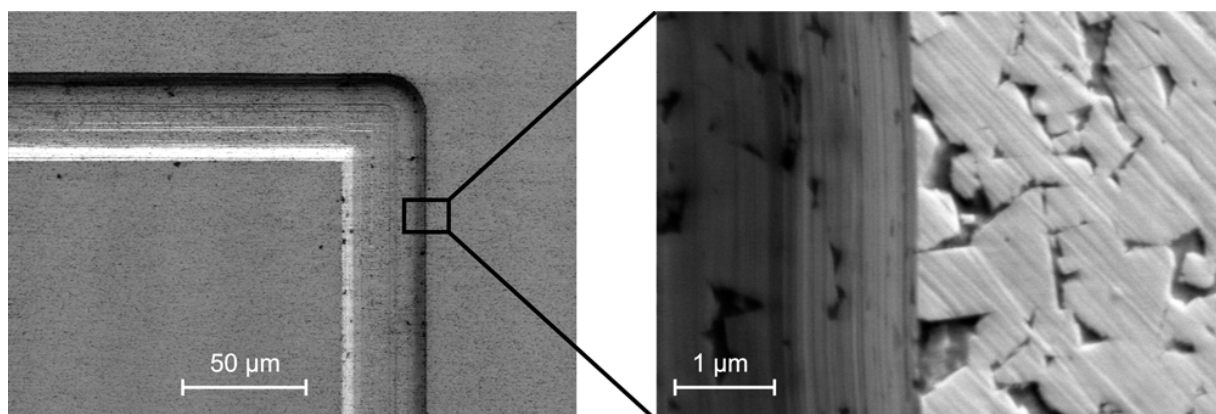


Рисунок 13.3 – Микроструктура, изготовленная в карбиде вольфрама

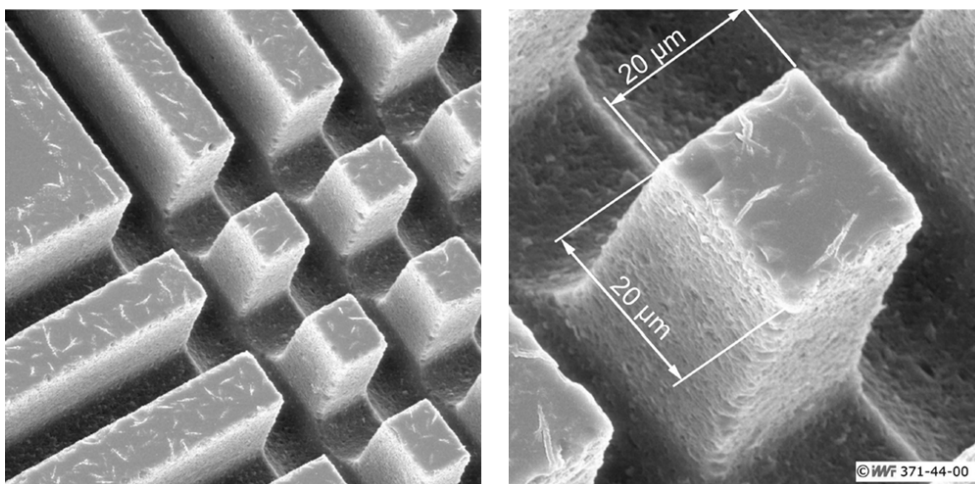


Рисунок 13.4 – Микроструктурированная поверхность: микростолбики в кварцевом стекле

Шлифовальные инструменты типа микрокарандаш (рис. 13.5) часто используются для производства сложных трехмерных структур. Этот тип инструмента относится к шлифовальным кругам без связки. Они изготавливаются тремя различными способами. Например, заготовки из карбида вольфрама покрывают алмазными зернами или зернами из кубического нитрида бора (рис. 13.5 в). Еще один тип микрокарандаша изготавливается путем спекания, где абразивные зерна связаны в слое бронзы на заготовке из карбида вольфрама. Обычно такие инструменты имеют диаметр около 200 мкм (рис. 13.5 б). Третий тип шлифовальных инструментов типа микрокарандаша изготавливается путем нанесения CVD покрытия из поликристаллических алмазных слоев. Минимальный диаметр таких инструментов около 50 мкм (рис. 13.5 а).

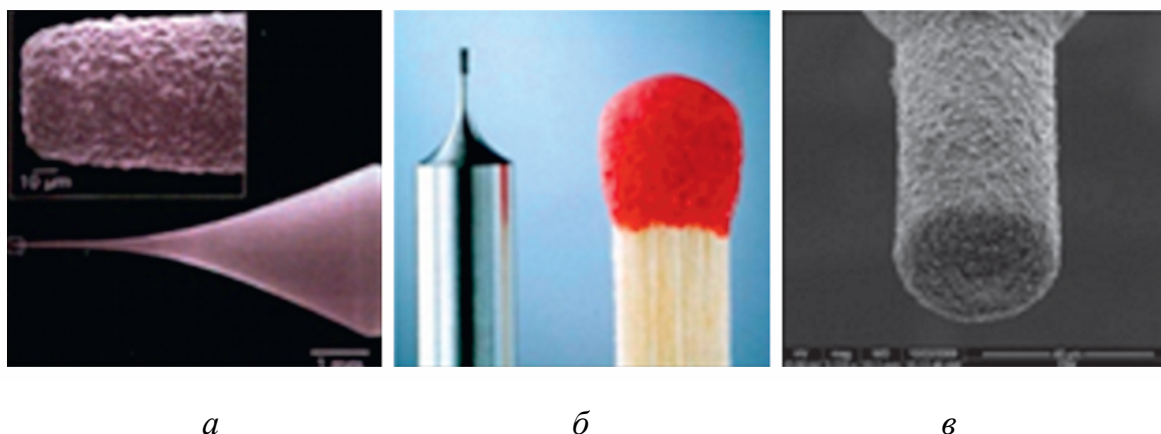


Рисунок 13.5 – Шлифовальные инструменты типа микрокарандаш

13.2. Влияние абразивных зерен на процесс микро- и наношлифования

Процесс наношлифования сопровождается износом зерен, и скорость износа играет важную роль в определении эффективности процесса наношлифования и качества обработанных поверхностей на наноуровне. Сложность изучения износа абразивных материалов при любом масштабе связана с тем, что в процессе одновременно реализуется большое количество различных взаимодействующих механизмов износа, таких как хрупкое разрушение, пластическое течение абразивов, трещинообразование в абразивах, химический износ и т. д.

Хрупкие материалы проявляют высокие прочностные свойства, когда находятся под сжимающими напряжениями. Присутствие относительно небольших растягивающих напряжений в абразивных зернах может привести к разрушению путем хрупкого излома. Существование растягивающих напряжений зависит от величины отношения тангенциальной к радиальной силе наношлифования $\frac{P_z}{P_y}$. Если отношение особенно мало, то растягивающие на-

пряжения существуют в клине и будут пропорциональны тангенциальной силе шлифования. Излом абразивного зерна зависит от конкретного типа используемого материала и величины растягивающих напряжений, возникающих при наношлифовании. Зерна алмаза при сжатии имеют предел прочности в десять раз больше, чем при растяжении. Вероятность разрушения возрастает с увеличением растягивающего напряжения в зерне, приводя к быстрой потере режущих свойств алмазных зерен и, следовательно, более низкому коэффициенту шлифования. Это означает, что необходимо определять составляющие силы шлифования на каждом активном режущем зерне.

Наиболее часто при наношлифовании применяются алмазные абразивы и абразивы из кубического нитрида бора.

При наношлифовании используются абразивы из природного и синтетического алмаза. Они имеют высокую износостойкость, теплопроводность, твердость и низкий коэффициент трения. Значительным препятствием для повсеместного применения алмазных абразивов является их химическое сродство с некоторыми металлическими материалами, что ведет к превращению алмаза в графит и образованию карбидов при высокой температуре шлифования. Это приводит к чрезвычайно высокому износу при наношлифовании углеродистых металлов. Поэтому алмазные абразивы, в основном, ис-

пользуются для шлифования хрупких нежелезистых материалов таких, как кремний, стекло, керамика, карбид вольфрама и т. д.

Во избежание окисления или других повреждений алмазных зерен они могут быть покрыты пленками соответствующих материалов. Алмазы с покрытием были разработаны, чтобы увеличить коэффициент шлифования и уменьшить количество разрушений алмазных зерен во время процесса nanoшлифования. Например, алмазные порошки с нитридборным покрытием имеют температуру окисления на 200 °С выше, чем традиционные алмазные зерна.

Другим подходом для увеличения срока службы алмазного абразивного инструмента является использование прочных крупнозернистых алмазных порошков октаэдрической формы (рис. 13.6) в специальных алмазных шлифовальных кругах. Эти алмазные порошки обладают высокой прочностью, термостабильностью и износостойкостью. Благодаря чрезвычайно тщательной процедуре просеивания используются очень однородные зерна, которые обеспечивают постоянное взаимодействие во время процесса nanoшлифования. В сочетании с титановым покрытием такие абразивы обеспечивают высокую механическую и химическую прочность связки, что значительно уменьшает вырывание зерен. Таким образом, возникает полуопределенный процесс nanoшлифования, который характеризуется минимальным износом.

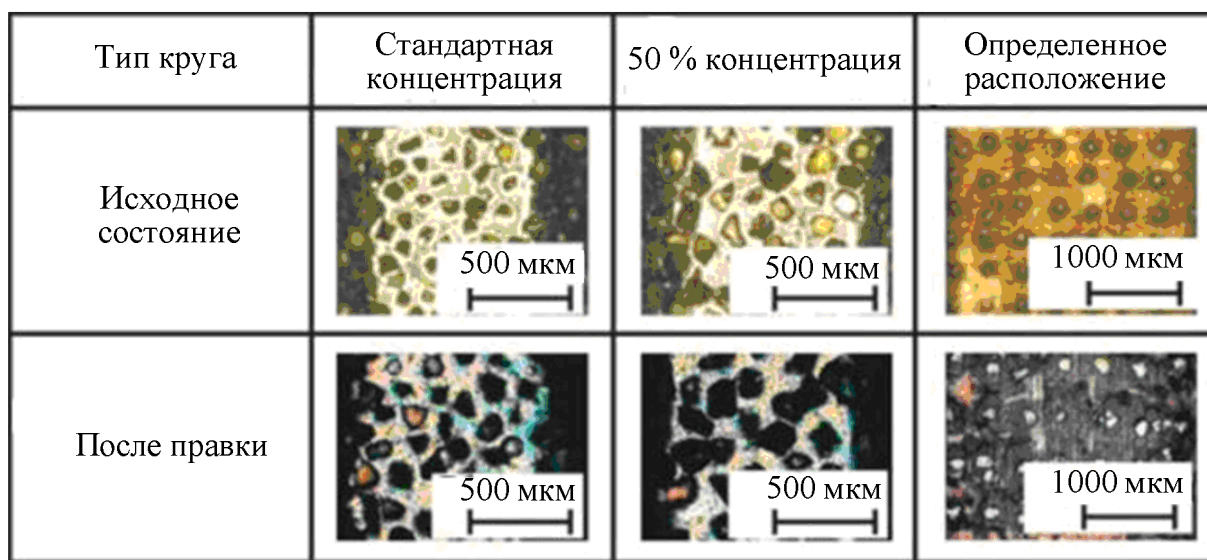
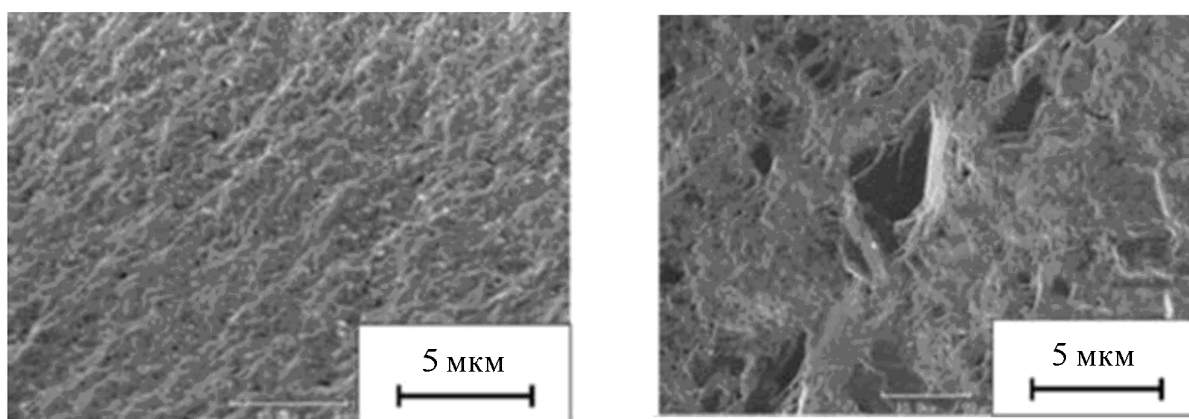


Рисунок 13.6 – Специальные прочные крупнозернистые алмазные шлифовальные круги с зернами октаэдрической формы после нанесения покрытия и после операций управления рабочей поверхностью

Для моделирования и прогнозирования процесса обработки и конечного качества обработанной поверхности (шероховатость поверхности, состояние приповерхностного слоя) можно предположить, что шлифовальные круги со случайным распределением зерен, которые обычно используются, необходимо заменить инструментами с четко определенной геометрией и топографией, чтобы обеспечить строго определенный процесс удаления материала.

Кубический нитрид бора (КНБ) имеет лучшую термохимическую стабильность по сравнению с алмазом. КНБ с ультра мелкими кристаллами (КНБ-У) – это специальный тип КНБ, который имеет в восемь раз выше коэффициент шлифования и лучшее сопротивление износу, чем обычный КНБ (рис. 13.7). Для наношлифования железистых и других материалов, которые реагируют с алмазом, кубический нитрид бора является лучшим выбором.



КНБ-У

КНБ

Рисунок 13.7 – Поверхности разрушения КНБ

13.3. Роль связки в реализации процесса шлифования в нанометрическом диапазоне

Наряду с абразивами связка абразивных инструментов очень важна для достижения качества и производительности наношлифования. *Основной функцией связки является удержание абразивных зерен на шлифовальном инструменте так долго, пока они будут заостренными, и избавиться от них, когда они затупятся.*

Наиболее часто в наношлифовании применяются металлические, полимерные и керамические связки. *Металлические связки изготавливаются путем спекания или нанесения электролитического покрытия.* Спеченные металлические связки используются для тонких кругов, которые обрабаты-

вают хрупкие материалы, например, разрезание полупроводниковых пластин или для шлифовальных инструментов типа микрокарандаш. Металлические связки с электролитическим покрытием применяются в однослойных наношлифовальных кругах со случайным или заданным положением зерен. Высокая теплопроводность и отличная износостойкость являются главными преимуществами шлифовальных инструментов с металлическими связками. Металлические электропроводные связки позволяют управлять профилем и рабочей поверхностью алмазных кругов.

Полимерные связки изготавливаются из синтетических смол или сочетаний синтетических смол. Этот тип связок позволяет обрабатывать материал при больших скоростях резания и удалять большие объемы стружки, при этом они не чувствительны к ударам и динамическим нагрузкам. Для наношлифования используются эпоксидная и полиэфирная смолы, обеспечивающие плавное и мягкое наношлифование, например, наношлифование кремниевых пластинок. Полиуретановая смола используется, если требуется высокая упругость кругов.

Керамические связки имеют стеклообразную структуру. Изготавливаются при высоких температурах из минеральных флюсов таких, как полевой шпат, обожженная глина и химические флюсы. Керамические связки имеют более высокую прочность для удержания абразивных зерен, и они легче поддаются процессам управления состоянием рабочей поверхности кругов. Модуль упругости примерно в 4 раза выше, чем у полимерных связок.

В специальных случаях при наношлифовании используются вулканитовые и полимерно-керамические связки. В вулканитовой связке абразивные зерна находятся в полимерных гранулах (диаметр приблизительно 100 мкм), чтобы избежать проваливания мелких зерен в связку. Основной причиной применения инструментов с вулканитовой и другими эластическими связками является отличное поглощение вибраций и способность создавать поверхности с нанометрической точностью. Полимерно-керамические связки были разработаны для предотвращения окисления и других повреждений алмазных зерен во время обжига керамических связок.

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Абразивные круги, используемые в процессах микро- и наношлифования, можно разделить на две большие группы – с определенным (упоря-

доченным) и с неопределенным расположением зерен. Первые являются предпочтительными. Снижению теплонапряженности способствует нанесение канавок на рабочей поверхности кругов или же так называемые сегменты круга.

2. По геометрической форме круги делят на периферийные шлифовальные микрокруги для шлифования непрерывных структур и пальцевые инструменты типа микрокарандаша для обработки прерывистых структур.

3. Сложность изучения износа абразивных инструментов состоит в том, что в процессе участвует огромное множество бесформенных зерен и одновременно реализуются различные механизмы износа – хрупкое разрушение, диффузия, адгезия, пластическое течение, трещинообразование т. д.

4. Наиболее эффективно применение алмазных и нитридных абразивов. Алмаз используют природный и синтетический. Однако его химическое сродство с металлическими материалами препятствует расширению областей применения. Важной составляющей износа является способность алмаза графитизироваться при высоких температурах и давлении. Нейтрализовать отрицательное влияние температуры можно с помощью покрытий, наносимых лазерным, электромеханическим, ионноплазменным и др. способами.

5. Важную роль в процессах наношлифования играют связки. Их назначение – удержание зерен в шлифовальном инструменте так долго, пока они работоспособны, и избавляться от них при затуплении. Следует помнить, что связки – металлические, керамические, полимерные, вулканические, полимерно-керамические – вступают в непосредственный контакт с обрабатываемым материалом, усиливая трение и физико-химическое взаимодействие.

*Уважение к истине –
начало премудрости.
А. Герцен*

Тема 14

УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

План:

- 14.1. Управление состоянием инструмента при микро- и наношлифовании.
 - 14.2. Классификация процесса микро- и наношлифования.
 - 14.3. Применение СОТС при микро- и наношлифовании.
 - 14.4. Моделирование полной трехмерной обработки поверхности.
- Заключение.

14.1 Управление состоянием инструмента при микро- и наношлифовании

Во время шлифования труднообрабатываемых материалов состояние шлифовального инструмента значительно влияет на протекание процесса обработки. Успешное наношлифование возможно только со стабильным состоянием рабочей поверхности шлифовальных кругов на протяжении всего цикла микро- или наношлифования. *Перед управлением состоянием рельефа и рабочей поверхностью круга ставят следующие задачи:*

- *желаемая макрогеометрия должна быть создана перед процессом наношлифования при помощи операций профилирования и вскрытия;*
- *необходимо, чтобы была создана подходящая микрогеометрия с соответствующим выступанием зерен при помощи операций управления электроэрозионным (электролитическим) воздействием на токопроводящую связку круга;*
- *связка в электропроцессах управления становится главным объектом воздействия.*

Мелкозернистые алмазные круги для микро- и наношлифования часто используются для прецизионной обработки функциональных поверхностей.

Сочетая их с металлическими связками, можно достичь высокой надежности профиля и обеспечить высокую износостойкость одновременно с высоким коэффициентом удаления материала. Традиционные процессы правки этих кругов исчерпали свои возможности и не соответствуют предъявляемым требованиям. Поэтому применяют интегрированные процессы профилирования абразивных инструментов для микро- и наношлифования. При использовании термического или электрохимического удаления материала связки нет механического контакта между шлифовальным кругом и правящим инструментом, как при традиционных процессах правки.

При микро- и наношлифовании эффективно используются электроразрядные методы (ЭРМ) (рис. 14.1) для образования желаемого профиля круга.

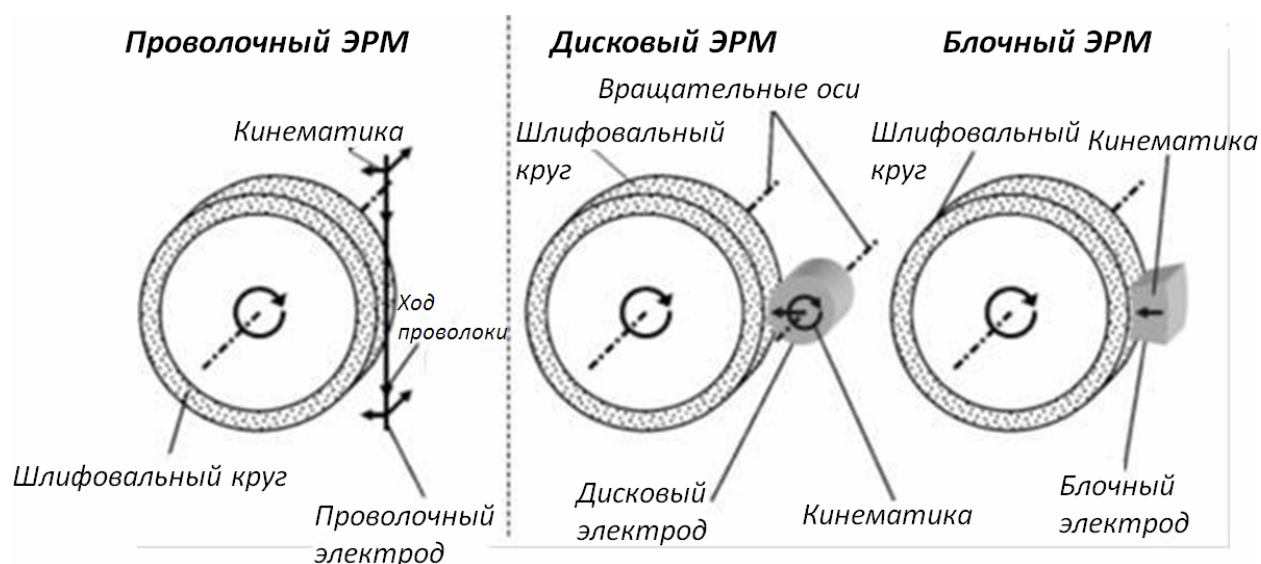


Рисунок 14.1 – Виды процесса ЭРМ управления рабочей поверхностью периферийных шлифовальных кругов

Существуют различные варианты этого процесса. Проволочный ЭРМ процесс предоставляет высокую гибкость для достижения почти любой макро- и микрогеометрии без необходимости дополнительной компенсации износа. Использование электродов в виде блоков и дисков предполагает более высокую жесткость системы и, соответственно, возможности для большего коэффициента удаления материала, но, с другой стороны, может потребоваться дополнительная компенсация износа. Из-за термической природы удаления материала во время процесса необходимо использовать очень маленькую энергию разрядов, чтобы избежать термических повреждений мелких алмазных зерен.

Управляя величиной силы тока, можно влиять на процесс удаления связки, добиваясь стабилизации такой высоты выступания зерен, при которой будут реализовываться механизмы износа зерен, обуславливающие заданную производительность и качество обработки.

Электрохимический метод (ЭХМ) эффективно используется для непрерывного процесса управления состоянием рабочей поверхности круга. Металлическая связка непрерывно удаляется непосредственно во время процесса микро- и наношлифования благодаря электролизу. Таким образом гарантируется постоянное использование заостренных зерен. Электрохимическое удаление материала связки не повреждает алмазные зерна. СОТС, применяемая во время наношлифовального процесса, используется как электролит для процесса ЭХМ. Быстрого износа связки можно избежать благодаря заданному электрохимическому процессу в пассивной области системы электролиза. Формирование оксидной пленки на поверхности анода предотвращает чрезмерный износ шлифовального круга. Электролиз продолжается только тогда, когда удаляется оксидная пленка механическим путем. С подходящими параметрами процесса будет формироваться динамический равномерный рост оксидной пленки и ее удаление. Это приведет к стабильным условиям управления рабочей поверхностью круга и стабильному процессу микро- и наношлифования. Принцип электрохимического воздействия на шлифовальные круги приведен на рис. 14.2.

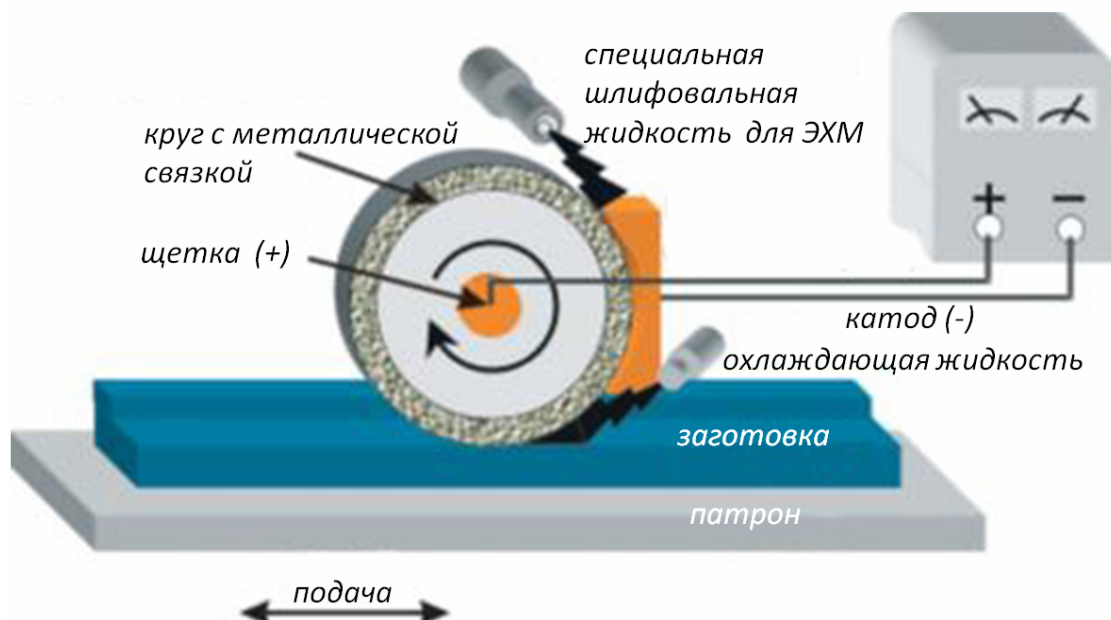


Рисунок 14.2 – Принцип действия микро- и наношлифования с электрохимическим воздействием на связку шлифовальных кругов

Используется комбинирование процессов ЭРМ (для эффективной грубой обработки) с электроэрозией (для размягчения и удаления материала связки) и традиционными методами (для достижения наиболее острых кромок).

Кроме управления рабочей поверхностью шлифовальных кругов на металлической связке, при помощи процессов ЭРМ и ЭХМ необходимо, чтобы были приняты во внимание некоторые другие технологии, используемые в микро- и наношлифовании:

- традиционная правка при помощи профильного ролика;
- традиционная правка блоком заточки;
- традиционная правка при помощи алмазных правящих инструментов и алмазного карандаша;
- дробление;
- лазерная правка.

Эти методы основываются на способности определять и компенсировать погрешности формы рабочей поверхности, вызванные износом круга и периодическими погрешностями станка.

14.2. Классификация процесса микро- и наношлифования

Статистическая оценка изменения параметров режущего рельефа круга в динамике, установление законов этих изменений, а также их взаимосвязи с изменением выходных показателей шлифования позволили предложить структурную схему оптимизации процессов шлифования на базе управления рабочей поверхностью кругов (рис. 14.3).

Оптимизация процесса шлифования достигается стабилизацией значения высоты выступления контактирующих зерен над связкой, оптимизированного по соответствующему выходному показателю шлифования Q, q, C, R_z – соответственно производительность, удельный расход, себестоимость обработки и шероховатость обработанной поверхности. Индексы «исх», «уст», «опт», относятся к исходным, установившимся и оптимизированным параметрам – высоте выступления зерен h , производительности Q , удельному расходу q , себестоимости C , шероховатости R_z ; v_3, v_c – интенсивность износа зерна и съема связки; τ – длительность шлифования.

Блок-схема на рис. 14.4 шаг за шагом описывает процедуру достижения требуемого поля допуска при микро- и наношлифовании. Перед обработкой шлифовальный круг и заготовка должны быть настроены в системе ко-

ординат станка. Затем готовится шлифовальный инструмент, его геометрия должна быть определена, чтобы создать числовую программу управления инструментом. Если поле допуска не обеспечилось, необходимо модифицировать программу управления пути инструмента, чтобы компенсировать погрешности. *Источниками, которые влияют на точность профиля обработанных поверхностей, являются погрешности установки инструмента, размерные погрешности инструмента, погрешности пути инструмента, а также износ инструмента. Во избежание этого необходимо непрерывное управление рабочей поверхностью инструмента или перепрограммирование пути инструмента.*

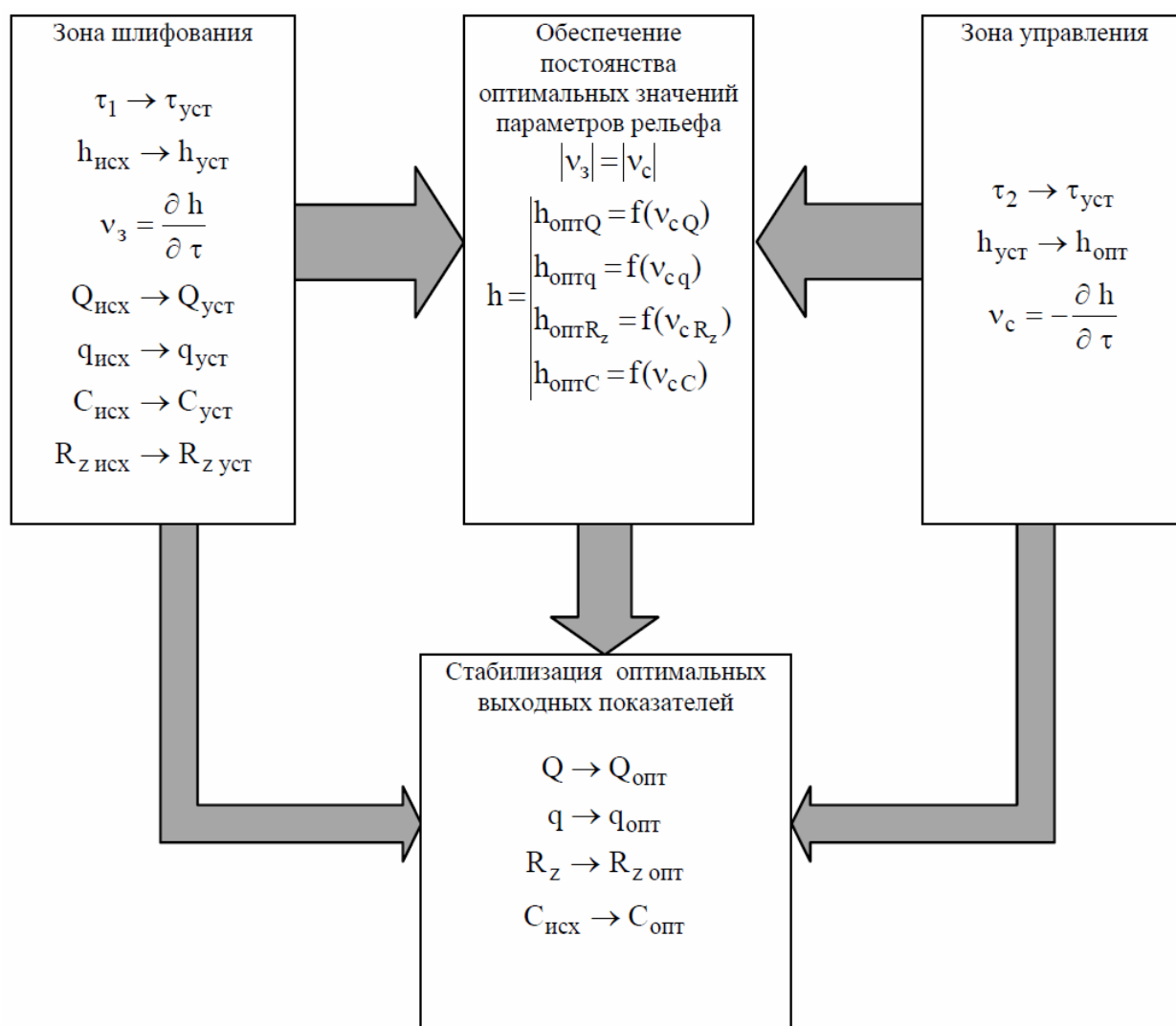


Рисунок 14.3 – Структурная схема оптимизации процесса шлифования



Рисунок 14.4 – Блок-схема микро- и наношлифования

14.3. Применение СОТС при микро- и наношлифовании

Жидкости при наношлифовании используются для уменьшения трения между обрабатываемым материалом и инструментом, для отвода тепла из зоны шлифования и для того, чтобы избежать термических повреждений поверхности заготовки. При наношлифовании имеет место малая глубина резания и, соответственно, малая длина контакта абразивных зерен с обрабатываемым материалом. Применение шлифовальных жидкостей с высоким смазывающим эффектом может препятствовать этому, поскольку нормальные силы возрастают из-за высокого давления в зоне резания. Показано, что давление в зоне контакта пропорционально периферийной скорости шлифовального круга и вязкости шлифовальной жидкости. Это приводит к ухудшению шероховатости поверхности и точности формы.

В экспериментах периферийного плоского nanoшлифования было исследовано влияние шлифовальных жидкостей на водной основе и на основе минеральных масел. Эксперименты были выполнены мелкозернистыми алмазными кругами на полимерной связке с глубиной резания 3 мкм и подачей 3 мм/мин. Обрабатываемым материалом было титано-никеле-нитридное покрытие на стальной заготовке. Рис. 14.5 показывает, что при использовании масла в качестве СОТС была достигнута шероховатость поверхности около $R_a = 30$ нм. В то же время, используя СОТС на водной основе, можно достичь шероховатости поверхности около $R_a = 10$ нм. Таким образом, в процессах nanoшлифования предпочтительно применение шлифовальных жидкостей на водной основе.

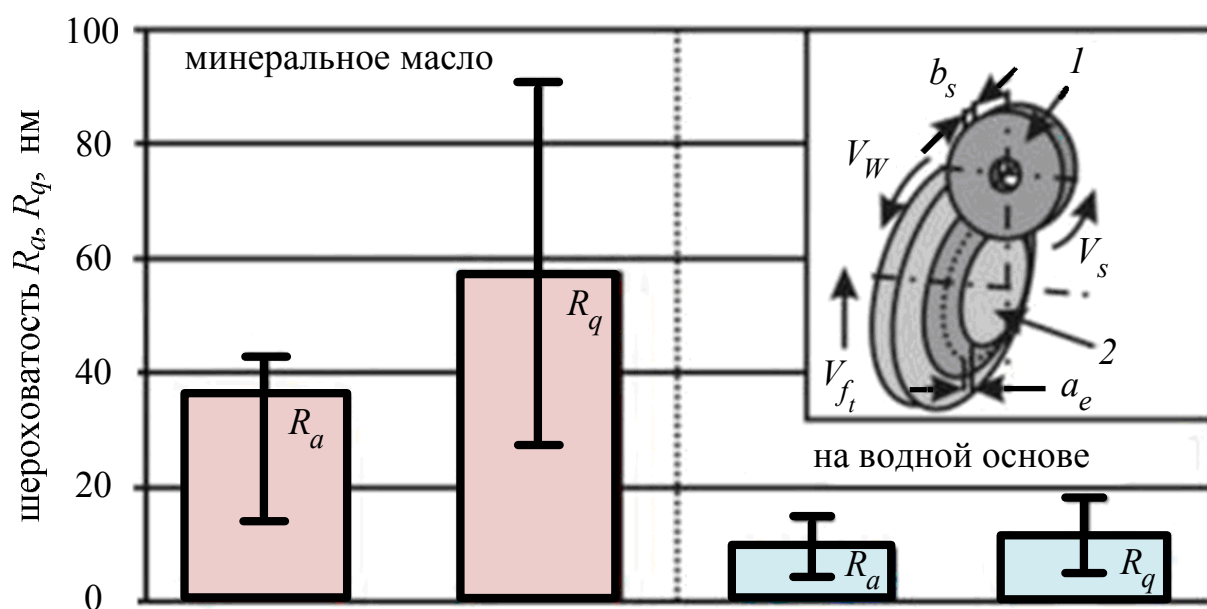


Рисунок 14.5 – Шероховатость поверхности титано-никеле-нитридного покрытия:
1 – шлифовальный круг; 2 – заготовка

14.4. Моделирование полной трехмерной обработки поверхности

Для абразивных процессов требования к модели более высокие, чем для процессов лезвийного резания, поскольку нет ортогональной симметрии и невозможно применить квази-2D модель. Кроме того, необходимо описать геометрию абразивов. Модель должна представлять достаточно пространства для трехмерного процесса деформации, стружкообразования и удаления ма-

териала. Рис. 14.6 *а* показывает моделирование с помощью молекулярной динамики при изучении нагромождения материала и формирования стружки во время наношлифования, зависящее от формы и ориентации шлифовальных зерен.

MD моделирование на рис. 14.6 *а* рассматривает два твердых пирамидальных зерна в различных положениях, которые имеют алмазную структуру. Модель трехмерного наношлифования состоит из более чем 100000 атомов меди (высота заготовки 6 нм). Модель рассматривает два абразива, которые режут при скорости 100 м/с через всю длину заготовки. Таким образом, применение периодических граничных условий (ПГУ) для обоих направлений горизонтальной плоскости приводит к полному формированию канавки зерном в направлении резания и описывает устройство модели с множеством контактов «зерно»—«заготовка» (рис. 14.7 *б*). Повторяя полное формирование канавки с относительным смещением абразивов в направлении резания, можно реализовать моделирование обработки всей поверхности. Это обеспечивает основу для анализа трехмерной шероховатости поверхности и остаточных напряжений, полностью обработанной поверхности при реалистических скоростях обработки.

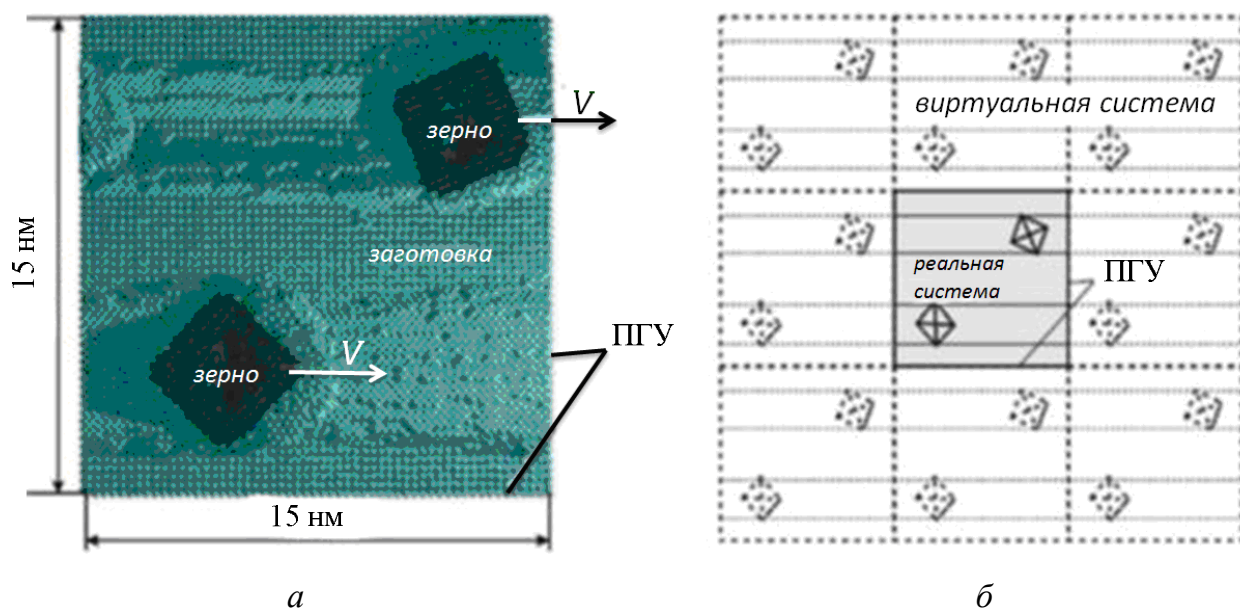


Рисунок 14.6 – Снимок модели наношлифования двумя твердыми абразивами (после 360000 шагов времени, 144 пикосекунд):

- а* – молекулярная динамика модели шлифования (вид сверху);
- б* – эффект двумерных ПГУ при моделировании шлифования

Тщательный анализ стружкообразования, упругих и пластических реакций заготовки и величин процесса MD выявил четкие и последовательные результаты. Скорость обработки имеет непосредственное влияние на микроскопический процесс удаления материала и формирование стружки при моделировании молекулярной динамики. Установлено, что зависимость результатов шлифования при моделировании от скорости обработки менее сильная, чем наблюдалось в экспериментальных исследованиях. Возможная причина этого эффекта заключается в том, что примененные граничные условия и настройки модели имеют сильное влияние на динамику модели конечного процесса. Значительный рост величины скорости обработки приводят к существенным изменениям формы стружки и механизма стружкообразования. При высоких скоростях резания процесс находится под влиянием возрастающей локализации деформации. Непосредственное воздействие на результаты моделирования оказывают глубина резания, ориентация зерен и радиус режущей кромки. Таким образом, с помощью молекулярной динамики можно моделировать влияние формы и ориентации зерен на эффективность абразивного процесса. На основании больших моделей молекулярной динамики в будущем будет возможно определить рассеивание энергии при помощи непосредственного анализа упругой и пластической деформации и микромеханизмы, определяющие шероховатость процесса при nanoшлифовании.

Заключение

Теперь студенты должны знать следующее.

1. Результативное применение микро- и nanoшлифования требует стабилизации рабочей поверхности кругов во всем периоде обработки. Исходное выступание зерен над связкой должно изменяться в процессе работы, что требует противодействия на связку с целью сравнять интенсивность износа с интенсивностью удаления связки. Поэтому применяют интегрированные процессы шлифования (макропрофиль) и управления рабочей поверхностью кругов. Сюда относят термические, электромеханические, электроразрядные. Все эти методы основываются на способности определять и компенсировать погрешности формы круга и состояние его рабочей поверхности, вызванное износом круга и погрешностями СПИЗ.

2. Статистическая оценка изменения параметров режущего рельефа круга в динамике, установление законов этих изменений, а также их взаимосвязи с изменением выходных показателей шлифования позволили предло-

жить структурную схему оптимизации процессов микро- и наношлифования на базе управления рабочей поверхностью кругов. Оптимизация процесса достигается стабилизацией значения высоты выступания контактирующих зерен над уровнем связки, соответствующего оптимизированным значениям выходных показателей шлифования – производительности, удельному расходу, себестоимости или шероховатости. Проблема решается установлением необходимой интенсивности удаления связки одним из указанных выше способов.

3. Применение СОТС при микро- и наношлифовании продиктовано как теми же соображениями, что и при макрошлифовании, так и особенностями процессов резания в нанометрическом диапазоне. Прежде всего не выяснено, какова может быть роль СОТС в протекании процессов перехода механизма стружкообразования из хрупкого в пластический и наоборот. Не ясно, например, будет ли полезным в этом плане снижение температуры из-за охлаждающего действия СОТС, каково влияние СОТС на поверхностные процессы (эффект Ребиндера). В то же время уже можно считать установленным, что более предпочтительным для нанопроцессов являются СОТС на водной основе, а не масла, что противоположно макрошлифованию.

4. Методом молекулярной диагностики установлено, что на выходные показатели микро- и наношлифования существенное влияние оказывает глубина резания (толщина среза), ориентация и расстановка зерен, радиус округления режущей кромки, а также скорость резания.

*Когда мы стремимся искать неведомое нам,
то становимся лучше, мужественнее
и деятельнее тех, кто полагает,
будто неизвестное нельзя найти
и незачем искать.*

Платон

Тема 15

СРАВНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ТРАДИЦИОННОГО (МАКРО-), МИКРО- И НАНОРЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

План:

- 15.1. Сравнение процессов традиционного, микро- и нанорезания.
- 15.2. Принципиальные особенности процессов микро- и нанорезания.
- 15.3. Тенденции развития.
- 15.4. Хронология развития нанонауки, нанотехнологии, нанопроизводства.

15.1. Сравнение процессов традиционного, микро- и нанорезания

Микро- и нанорезание базируется на осознании того уже бесспорного факта, что атомно-молекулярные манипуляции в наноразмерном диапазоне до 100 нм позволяют получить материалы с новыми свойствами и с новым поведением. Уникальным обстоятельством при этом является то, что новое поведение таких материалов зависит от размеров частиц, их состава – одних и тех же исходных атомов, молекул, кластеров. Эти особые свойства конструкционных и инструментальных материалов естественно являются причиной проявления тех особенностей, которые отличают системы макро-, микро- и нанорезания. Идеально системы нанорезания формируются на 100 % из нанообъектов, обладающих новыми свойствами, а, значит, создаются объективные предпосылки для проявления особенностей контактного (и полевого, см. тему 5) взаимодействия. Ряд конвенциональных понятий обработки – традиционной (макро-), прецизионной, ультрапрецизионной дополняется (возможно замыкается?) понятием микро- и нанорезания.

К базовым кардинальным различиям макрорезания, микро- и нанорезания можно отнести следующие основополагающие явления и закономерности (табл. 15.1).

- Традиционное резание рассматривает процессы стружкообразования и взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала на основе законов механики сплошных сред.

Процессы нанорезания рассматриваются с позиций дискретной атомно-молекулярной механики.

- Системы резания отличаются тем, что в идеальном случае все составляющие системы нанорезания относятся к разряду нанообъектов, т. е. имеют характерный наноразмер, не превышающий 100 нм, и «новые свойства». Это характерно прежде всего для структурных составляющих – атомно-молекулярных слоев, кластеров и др.

- При макрорезании речь идет о твердотельном контактировании лезвия режущего инструмента и обрабатываемой заготовки.

К нанорезанию применим подход, позволяющий рассматривать взаимодействие полей – энергетических, электромагнитных, силовых, слабого и сильного гравитационного. По своим энергетическим характеристикам нанорезание эквивалентно взрыву, т. е. локализованной высокоэнергетической технологии.

- Для процессов микро- и нанорезания в отличие от макрорезания характерны хрупко-пластические переходы и уникальный механизм пластической деформации – зернограничное некристаллографическое скольжение (целых кластеров).

- Не взирая на то, что наноструктурированные материалы имеют более высокие показатели твердости, для них характерна одновременно высокая пластичность и даже сверхпластичность. Это не соответствует законам механики сплошных сред, в соответствии с которыми повышение твердости неизменно ведет к уменьшению пластичности.

- Предельно допустимая точность для нанорезания характеризуется как атомарная, тогда как макрорезание (фрезерование, точение) обеспечивает точность в пределах 10–100 мкм.

- Как атомарная характеризуется и шероховатость поверхности, сформированной в условиях нанорезания копированием рельефа режущей кромки.

Таблица 15.1 – Сравнение нанометрической и традиционной механической обработки

Характеристики		Вид обработки	
		Нанометрическая механическая обработка	Традиционная механическая обработка
Основополагающие принципы процесса резания		Дискретная молекулярная механика/микромеханика	Механика разрушения сплошных сред
Структура обрабатываемого материала		Гетерогенный (наличие микроструктуры)	Гомогенная
Физика процесса резания		Модель атомарного кластера или наночастицы	Модель плоскости сдвига
Сила и энергия резания	Учет (анализ) энергии	Межатомный потенциальный функционал	Мощность резания
	Удельная энергия	Высокая	Низкая
	Сила резания	Межатомные силы	Пластическая деформация/трение
Стружкообразование	Инициирование формирования стружки	Внутренняя деформация кристалла (точечный дефект или дислокация)	Межкристаллическая деформация (пустоты между зернами)
	Деформация и напряжение	Прерывистая	Непрерывная
Режущий инструмент	Радиус округления режущей кромки	Нанометрический	Более нанометрического
	Износ инструмента	Задняя поверхность и режущая кромка	Передняя или задняя поверхность
Достижимая точность	Фрезерование. Точение	Атомарная	10–100 мкм
Достижимая шероховатость	R_a	Атомарная	До 5 нм

Прецизионная обработка резанием неформально определяется как компонент производства объектов с отношением размера к допуску лучше, чем 10000:1. Микрообработка преследует создание мини- и микросистем разме-

рами менее 1 см с использованием компонентов от 1 мкм до 100 мкм. Обработка с точностью 0,01 мкм (10 нм)–0,001 мкм (1 нм) определена Танигучи как ультрапрецизионная. Традиционная обработка (точение, фрезерование) может достигать точности в диапазоне 10–100 мкм, а нанообработка – выше диапазона точности ультрапрецизионной обработки до атомарной.

Табл. 15.1 позволяет сравнить процессы по таким показателям, как основополагающие принципы процесса резания – структура материала, физика резания, затрачиваемые силы и энергия, стружкообразование, режущий инструмент, достигаемая точность и др.

Приведенные данные для сравнения указывают на огромный потенциал процессов нанорезания, который пока еще очень мало изучен.

15.2. Принципиальные особенности процессов микро- и нанорезания

Принципиальными особенностями процессов микро- и нанорезания являются:

- локализация зоны всех процессов и эффектов;
- трансформация механизмов пластичного и хрупкого разрушения в нанопроцессе стружкообразования, которая происходит вследствие большого гидростатического давления и температуры в области вершины режущего лезвия и зависит, прежде всего, от соотношения толщины срезаемого слоя и радиуса округления режущей кромки инструмента, или от соотношения текущего значения толщины срезаемого слоя и его критического значения, уровня гидростатического давления в зоне вершины режущего клина и уровня температуры;
- значительное влияние скорости резания на нанопроцесс снятия материала, формирование наностружки: с ее изменением существенно изменяется форма наностружки, механизм образования, локализуется зона деформации;
- высокая температура, наблюдаемая на режущей кромке: именно на режущей кромке происходят деформационные сдвиги материала заготовки; заметную роль в тепловых процессах играет износ алмазного инструмента;
- структура приповерхностного слоя в условиях хрупкого и пластического режимов nanoшлифования;
- возможность реализации моделирования полной трехмерной обработки поверхности, что обеспечивает основу для анализа трехмерной шероховатости поверхности и остаточных напряжений.

Исследования в этой области будут понуждать и активизировать развитие целого спектра наук в силу междисциплинарной природы нанотехнологий.

15.3. Тенденции развития

На основе обобщений изложенного материала можно обсудить основные тенденции развития микро- и нанорезания материалов.

Нанообработку можно классифицировать по четырем группам.

1. *Детерминированная механическая нанообработка.* Она реализуется с применением неподвижно закрепленных и сознательно управляемых инструментов, которые обеспечивают точную форму трехмерных изделий. Съем материала минимизирован до десятков нанометров. Сюда относятся алмазное точение, микрофрезерование, микро- и nanoшлифование и др.

2. *Нанообработка свободным абразивом.* При реализации этих способов используются свободные абразивные микро- и нанозерна. Единичные не связанные зерна снимают малые объемы обрабатываемого материала. Сюда относятся полирование, доводка, хонингование, суперфиниширование и др.

3. *Немеханическая нанообработка.* К этой группе относятся способы электроионные, микроэлектроразрядные, лазерные и др.

4. *Литографические способы.* Реализуются с использованием масок для точного изготовления формы изделия.

Из этого массива способов обработки наибольшие преимущества имеет механическая обработка, которая гарантированно обеспечивает точность изготовления трехмерных объектов до нанометрических характеристик точности и качества поверхности. Процессы микро- и нанорезания находят свое место в необозримом поле нанотехнологий. При этом не должно смущать то обстоятельство, что развитие нанотехнологий, их междисциплинарный объединяющий характер и последствия носят глобальный характер, затрагивая все сферы существования и деятельности человечества.

Сейчас обсуждаются направления развития в краткосрочной (10–20 лет), среднесрочной (до 30 лет) и в далекой перспективе (более 30 лет). Предлагаются проекты, которые кроме как фантастическими не назовешь. Достаточно упомянуть проект космического лифта.

С позиций исследователей, занимающихся процессами нанорезания, немаловажным будет своеобразная конкуренция и в интеграции и реализация принципов «снизу вверх» и «сверху вниз». Атомно-молекулярные манипуляции являются основой создания нанообъектов с уникальными свойствами,

которые найдут эффективное применение в самых различных областях жизнедеятельности человека, при этом немаловажным их достоинством является практическая безотходность, ресурсосберегаемость и т. д.

Реализация принципов «сверху вниз» и «снизу вверх» в нанометрическом диапазоне соответствует современной парадигме. Однако разработчикам процессов микро- и нанорезания необходимо тщательно анализировать и экономически оценивать предпочтительную нанотехнологию на базе сравнения их потенциалов.

Речь идет о сравнении двух возможных принципиально отличных направлений достижения нового конечного результата в условиях создания объектов индустрии наносистем. Это направление (от большого к малому) реализуется путем многократного уменьшения создаваемого объекта, например, последовательным удалением слоев материала (например, строгание) или нанотехнологии получения интегральных микросхем. Успешно преодолевается 100 нм диапазон простых по конструкции элементов. Сложнее обстоит дело при конструировании многоэлементного (многоуровневого) изделия. В этих условиях следует ожидать новых возможностей от применения принципа генеративных нанотехнологий, которые из-за своей универсальности практически не имеют ограничений по сложности конструкции. Речь идет о сближении технологий «по атомного» строительства с принципом послойного наращивания. В первом случае речь идет об атомно-молекулярной манипуляции с отдельными атомами или кластерами, а во втором – о конструировании изделия из слоев, содержащих огромное количество атомов.

Тем не менее, уже сегодня есть немало областей, где микро- и нанорезание успешно применяется. Например, формирование изделий из монокристаллов различных химических элементов не может быть выполнено по технологии «снизу вверх» по атомным или послойным наращиваниям: оно требует применения микронанорезания (нанофрезерования, наношлифования и т. д.).

15.4. Хронология развития нанонауки, нанотехнологии, нанопроизводства

Предыстория современных нанотехнологий связана с многовековыми исследовательскими усилиями ученых многих стран мира и имеет свой длинный исторический «шлейф». Рассмотрим наиболее значимые этапы.

- «Отцом» нанотехнологии можно считать греческого философа Демокрита, который примерно в **400 г.** до н.э. впервые использовал слово *«атом»* для описания самой малой частицы вещества.

- **1661 г.** Ирландский физик и химик Р. Бойль, один из учредителей Лондонского Королевского Общества, в труде «Химик-скептик» указал на потенциальную важность *мельчайших частиц – кластеров* («корпускул»). Критикуя воззрение Аристотеля о материи, состоящей из четырех первооснов (земли, огня, воды и воздуха), автор предположил, что все материальные объекты состоят из сверхмалых корпускул, которые достаточно устойчивы и в разных сочетаниях образуют различные вещества и предметы. Впоследствии идеи Демокрита и Бойля были приняты научным сообществом.

- **1857 г.** Английский физик М. Фарадей, основоположник учения об электромагнитном поле, впервые получил устойчивые *коллоидные растворы* золота (жидкие системы с мельчайшими частицами дисперсной фазы, свободно и независимо друг от друга перемещающимися в процессе броуновского движения). Впоследствии коллоидные растворы стали широко использоваться для формирования наносистем.

- **1861 г.** Английский химик Т. Грэм ввел *деление веществ по степени дисперсности структуры* на коллоидные (*аморфные*) и кристаллоидные (*кристаллические*).

- Примером первого использования нанотехнологий можно считать изобретение в **1883 г.** американским изобретателем Д. Истменом, основателем известной компании Kodak, рулонной фотопленки, представляющей собой нанесенную на прозрачную эластичную основу (например, из ацетата целлюлозы) эмульсию галогенида серебра, разлагающегося под действием света с образованием *наночастиц чистого серебра*, которые и являются пикселями изображения.

- **1900 г.** Немецкий физик М. Планк ввел понятие кванта действия (постоянная Планка) – исходного пункта для квантовой теории, положения которой существенны при описании поведения наносистем.

- **1905 г.** Первым ученым, использовавшим измерения в нанометрах, принято считать известного физика Альберта Эйнштейна, который теоретически доказал, что размер молекулы сахара равен одному нанометру (10^{-9} м).

- **1924 г.** Французский физик Луи де Бройль выдвинул идею о волновых свойствах материи, положив тем самым начало *квантовой механике*,

изучающей движение микрочастиц. Законы квантовой механики особенно актуальны при создании наноразмерных структур.

- **1931 г.** Немецкие физики М. Кнолл и Э. Руска создали электронный просвечивающий микроскоп, ставший прообразом нового поколения устройств, которые позволили заглянуть в мир нанобъектов.

- **1939 г.** Компания Siemens выпустила первый промышленный электронный микроскоп с разрешающей способностью ~ 10 нм.

- **1959 г.** Американский физик, Нобелевский лауреат Р. Фейнман в знаменитой лекции в Калифорнийском технологическом институте, известной под названием «Там, внизу, еще много места» («There's Plenty of Room at the Bottom»), высказал идеи управления строением вещества на атомарном уровне: «Научившись регулировать и контролировать структуры на атомном уровне, мы получим материалы с совершенно неожиданными свойствами и обнаружим совершенно необычные эффекты... Развитие техники манипуляции на атомарном уровне позволит решить многие проблемы». *Эта лекция стала в определенном смысле стартовой площадкой для наноисследований.* Многие идеи-предвидения, высказанные Р. Фейнманом, казавшиеся фантастическими (о гравировании линий шириной в несколько атомов посредством электронного пучка, о манипулировании отдельными атомами для создания новых малых структур, о создании электрических цепей нанометровых масштабов, о применении наноструктур в биологических системах), сегодня уже реализованы.

- **1966 г.** Американский физик Р. Янг, работавший в Национальном бюро стандартов, изобрел *пьезодвигатель*, применяемый сегодня в сканирующих зондовых микроскопах для точного позиционирования наноинструмента.

- **1968 г.** Сотрудники научного подразделения американской компании Bell А.Чо и Д. Артур разработали *теоретические основы нанообработки поверхности*.

- **1971 г.** Компаниями Bell и IBM получены первые полупроводниковые пленки одноатомной толщины – *квантовые ямы*, что послужило началом эпохи «практических» нанотехнологий.

Р. Янг выдвинул идею прибора Topografiner, послужившего *прообразом зондового микроскопа*.

- **1974 г.** Впервые термин «нанотехнология» предложен японским физиком Н. Танигучи в докладе «Об основных принципах нанотехнологии» («On the Basic Concept of Nanotechnology») на международной конференции

задолго до начала масштабных работ в этой области. Этот термин был использован для описания сверхтонкой обработки материалов с нанометровой точностью. Термином «нанотехника» было предложено называть механизмы размером менее одного микрометра.

- **1981 г.** Немецкие физики Г. Биннинг и Г. Рорер, сотрудники компании IBM (International Business Machines Corporation), создали *сканирующий туннельный микроскоп* (Нобелевская премия 1986 г.) – первый прибор, позволяющий не только получать трехмерное изображение структуры из электропроводного материала с разрешением порядка размеров отдельных атомов, но и осуществлять воздействие на вещество на атомарном уровне, т.е. манипулировать атомами, а, следовательно, непосредственно собирать из них любое вещество.

- **1985 г.** Коллектив ученых в составе Г. Крото (Англия), Р. Керла, Р. Смолли (США) открыл *новую аллотропную форму существования углерода в природе – фуллерен* и исследовал его свойства (Нобелевская премия 1996 г.). Возможность существования сферических высокосимметричных молекул углерода была предсказана в 1970 г. японскими учеными Э. Осавой и З. Йошидой. В 1973 г. российские ученые Д. А. Бочвар и Е. Г. Гальперн теоретическими квантовохимическими расчетами доказали стабильность таких молекул.

- **1986 г.** Создан *сканирующий атомно-силовой микроскоп* (авторы – Г. Биннинг, К. Куатт, К. Гербер, сотрудники IBM, Нобелевская премия 1992 г.), позволивший, в отличие от сканирующего туннельного микроскопа, изучать атомарную структуру не только проводящих, но и любых материалов, в том числе органических молекул, биологических объектов и т.д.

Нанотехнологии стали известны широкой публике. *Базовая системная концепция*, осмыслившая предыдущие достижения, прозвучала в книге американского футуролога, сотрудника лаборатории искусственного интеллекта Массачусеттского технологического института Э. Дрекслера «Двигатели создания: наступающая эра нанотехнологии» («Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology»). Автор предсказал активное развитие и практическое применение нанотехнологий. Этот прогноз, рассчитанный на многие десятилетия, оправдывается шаг за шагом с существенным опережением по времени.

- **1987 г.** Первый одноэлектронный транзистор создан американскими физиками Т. Футоном и Г. Доланом (компания Bell Labs).

Французский физик Ж.М. Лен ввел в обиход понятия «самоорганизация» и «самосборка», ставшие ключевыми при конструировании нанообъектов.

- **1988–1989 гг.** Двумя независимыми группами ученых под руководством А. Фера и П. Грюнберга открыто явление *гигантского магнитного сопротивления* (GMR) – квантовомеханического эффекта, наблюдаемого в тонких пленках из чередующихся ферромагнитных и немагнитных слоев, проявляющегося в существенном уменьшении электрического сопротивления в присутствии внешнего магнитного поля. Использование данного эффекта позволяет производить запись данных на жестких дисках с атомарной плотностью информации (Нобелевская премия 2007 г.).

- **1989 г.** Продемонстрировано *первое практическое достижение нанотехнологии*: с помощью сканирующего туннельного микроскопа, произведенного фирмой IBM, американские исследователи Д. Эйглер, Э. Швейцер выложили три буквы логотипа компании («IBM») из 35 атомов ксенона путем их последовательного перемещения на поверхности монокристалла никеля.

- **1990 г.** Коллектив ученых во главе с В. Кретчмером (Германия) и Д. Хаффманом (США) создал эффективную *технология синтеза фуллеренов*, что способствовало интенсивному изучению их свойств, определению перспективных областей их применения.

- **1991 г.** Японским физиком С. Ииджима открыта новая форма углеродных кластеров – *углеродные нанотрубки*, которые проявляют целый спектр уникальных свойств и являются основой для революционных преобразований в материаловедении и электронике.

В Японии начала реализовываться государственная программа по развитию техники манипулирования атомами и молекулами – проект «Атомная технология» («Atomic Technology»).

- **1993 г.** В США организована *первая нанотехнологическая лаборатория*.

- **1994 г.** Впервые продемонстрирован *лазер на основе самоорганизованных квантовых точек* (Д. Бимберг, Германия).

- **1998 г.** Голландский физик С. Деккер создал *первый нанотранзистор на основе нанотрубок*.

В Японии запущена *программа «Astroboy»* по развитию наноэлектроники, способной работать в условиях космоса.

- **1999 г.** Американские ученые М. Рид и Д. Тур разработали *единые принципы манипуляции как одной молекулой, так и их цепочкой.*

Элементная база микроэлектроники преодолела рубеж 100 нм.

- **2000 г.** В США приступили к реализации *широкомасштабной программы исследований в области нанотехнологий*, названной Национальной нанотехнологической инициативой (NNI).

Немецкий физик Р. Магерле предложил *технология нанотомографии* – создания трехмерной картины внутреннего строения вещества с разрешением 100 нм. Проект финансировала компания Volkswagen.

- **2002 г.** Сотрудники исследовательского центра компании Hewlett Packard (США) Ф. Кьюкес и С. Уильямс запатентовали *технология создания микросхем на основе пересекающихся нанопроводов со сложной логикой, реализованной на молекулярном уровне.*

С. Деккер соединил углеродную нанотрубку с ДНК, получив *единый наномеханизм.*

- **2004 г.** В Манчестерском университете (Великобритания) создан *графен* – материал со структурой графита толщиной в один атом, перспективный заменитель кремния в интегральных микросхемах (за создание графена ученым А. Гейму и К. Новоселову в 2010 г. присуждена Нобелевская премия).

- **2005 г.** Компания Altair Nanotechnologies (США) объявила о создании *наноаккумулятора.*

- **2006 г.** Исследователи из Северо-Западного университета США разработали *первый «печатный станок» для наноструктур* – установку, позволяющую производить в наноразмерном диапазоне одновременно более 50 тысяч наноструктур с атомарной точностью и одинаковым молекулярным шаблоном на поверхности, что является фундаментом для будущего массового производства наносистем.

Американским ученым из IBM удалось впервые в мире создать *полнофункциональную интегральную микросхему на основе углеродной нанотрубки.*

Д. Тур из университета Райса (США) создал *первую движущуюся наносистему* – молекулярную машину размером ~ 4 нм.

Группа ученых из Портсмутского университета (Великобритания) разработала *первый электронный бионанотехнологический переключатель на основе ДНК*, который является перспективной основой для связи между «миром» живых организмов и «миром» компьютеров.

Ученые из Калифорнийского технологического института (США) разработали *первый портативный биосенсор-анализатор крови* (портативную лабораторию, «lab-on-chip»).

- **2007 г.** Компания Intel (США) начала выпускать *процессоры, содержащие наименьший структурный элемент размером ~ 45 нм.*

Сотрудниками Технологического института (штат Джорджия, США) разработана технология сканирующей литографии с разрешением 12 нм.

Приведенные и другие исследования, открытия, изобретения дали мощный толчок применению нанотехнологических методов в промышленности. Началось бурное развитие *прикладной нанотехнологии*.

Появились первые коммерческие наноматериалы – нанопорошки, нанопокрyтия, объемные наноматериалы, нанохимические и нанобиологические препараты; созданы первые электронные устройства, сенсоры различного назначения на базе нанотехнологий; разработаны многочисленные методы получения наноматериалов.

Многие страны мира активно включились в исследования по проблемам нанотехнологий на уровне правительств и глав государств, оценив перспективы в будущем. В ведущих университетах и институтах мира (США, Германия, Япония, Россия, Англия, Франция, Италия, Швейцария, Китай, Израиль и т. д.) созданы лаборатории и отделы наноструктур, которые возглавили известные ученые.

Нанотехнологии уже используются в наиболее значимых областях человеческой деятельности – радиоэлектронике, информационной сфере, энергетике, транспорте, биотехнологии, медицине, оборонной промышленности.

Сегодня в наноисследованиях задействовано более 50-ти стран мира. За уникальные результаты исследований в этой области присуждено восемь Нобелевских премий.

Приложение А

Описание лекционной дисциплины

Факультет:

Кафедра:

Напряг: Інженерна механіка

Спеціальність: Технологія машинобудування

Кваліфікація: спеціаліст

ОПИС ЛЕКЦИЙНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

1. **Назва дисципліни:** Процеси мікро- і нанорізання матеріалів
2. **Код дисципліни:**
3. **Вид дисципліни:** вибіркова
4. **Рівень:** спеціаліст
5. **Курс навчання:** п'ятий
6. **Семестр:** десятий
7. **Кількість кредитів ЄКТС, що присвоюються:** 2
8. **П.І.Б. лектора:**
9. **Результат навчання з предмету – засвоєні знання, вміння, компетенції (мета):** Сформувати у студентів основні поняття і дати фундаментальні знання про мікро- і нанобробку матеріалів; надати обширну інформацію про застосування мікро- та нанорізання в передовому виробництві і техніці.
10. **Форма навчання:** аудиторне
11. **Попередні вимоги:** студенти повинні володіти основами технічних знань, зокрема фізики різання матеріалів, раніше отриманими в вищому навчальному закладі, вміти логічно мислити та робити висновки.
12. **Зміст дисципліни:** Основні поняття і визначення. Нанобр'єкти системи нанорізання та способи отримання наноструктурованих матеріалів. Основні властивості наноматеріалів як об'єктів системи нанорізання. Властивості конструкційних і інструментальних наноматеріалів та нанопокриття. Нанопроцеси, які відбуваються в системі нанорізання матеріалів. Особливості механізмів взаємодії інструменту з оброблюваними матеріалами і стружкою в нанометричному діапазоні. Загальна характеристика і можливості застосування методу молекулярної динаміки для вивчення процесів нанорізання матеріалів. Характеристика процесу шліфування. Порівняння традиційного та мікро- і нанорізання. Тенденції розвитку.
13. **Бібліографія:** Балабанов В.И. Нанотехнологии. Наука будущего / В.И. Балабанов. – М. : ЭКСМО, 2009. – 131 с.; Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси ; перев. с японского. – 2-изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 134 с.; Davim J. Paulo. Nano and Micromachining / Davim J. Paulo, Jackson J. Mark. – London : ISTE, Wiley, 2009. – 312 p.; Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех / М. Рыбалкина. – М. : Nanotechnology News Network, 2005. – 444 с.; Грабченко А.И. Введение в нанотехнологии : текст лекций / А.И. Грабченко, Л.И. Пупань, Л.Л. Товажнянский. – Харьков : НТУ «ХПИ», ЧПИ «Новое слово», 2012. – 288 с.
14. **Планування навчальної діяльності і методи викладання:** лекції
15. **Методи і критерії оцінювання:** модульні контрольні роботи і усний іспит.
16. **Мова викладання:** українська та російська
17. **Наявність виробничої практики:** немає

Лектор

Підпис

Прізвище, ім'я, по-батькові

Приложение Б

Учебная программа

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Навчальна програма

вибіркової дисципліни

Процеси мікро- і нанорізання матеріалів _____
(назва дисципліни)

для підготовки спеціаліста _____
(назва освітньо-кваліфікаційного рівня фахівця)

Напрямок підготовки 050201 «Інженерна механіка» _____
(шифр та назва напрямку)

Спеціальності 7.05050201 «Технологія машинобудування» _____
(шифр та назва спеціальності)

Спеціалізації «Високі технології в машинобудуванні» _____
(шифр та назва спеціалізації)

РОЗГЛЯНУТО

На засіданні кафедри

Протокол № _____

від “___” _____ 20__ р

Завідувач кафедри

(вчене звання, прізвище, ініціали)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Вченою радою

Протокол № _____

від “___” _____ 20__ р

Декан факультету

(вчене звання, прізвище, ініціали)

Харків 20__

Лист погодження

Навчальної програми Процеси мікро- і нанорізання матеріалів
(назва дисципліни)

«УЗГОДЖЕНО»

(найменування спеціальності)

(підпис зав. кафедри)

“ ” 20 р

(підпис зав. кафедри)

“ ” 20 р

(підпис зав. кафедри)

“ ” 20 р

«УЗГОДЖЕНО»

(найменування спеціальності)

(підпис зав. кафедри)

“ ” 20 р

(підпис зав. кафедри)

“ ” 20 р

(підпис зав. кафедри)

“ ” 20 р

Навчальна програми дисципліни
Процеси мікро- і нанорізання матеріалів
(найменування дисципліни)

Вступ.

Основні поняття та визначення, що відносяться до нанометричного діапазону системи різання. Елементарні об'єкти нанотехнологій. Макро-, мікро_ і нанообробка.

Нанооб'єкти системи нанорізання та їхній розмірний діапазон. Рівні наносистем нанорізання. Наноструктуровані матеріали та способи їх отримання. Нанотехнології у виготовленні різальних інструментів як нанооб'єктів системи нанорізання.

Структура та фізико-механічні властивості наноструктурованих матеріалів. Фактори, які викликають появу особливих властивостей і ефектів наноматеріалів. Порівняння властивостей традиційних та наноструктурованих матеріалів.

Отримання та властивості наноструктурованих інструментальних матеріалів і покриттів. Потенціал наноструктурованих інструментальних матеріалів. Функціональна роль нанопокриттів.

Різальний потенціал процесів нанообробки. Роль нанооб'єктів систем нанорізання. Наноефекти і нанопроцеси, що реалізуються в системі нанорізання в процесі обробки. Концепція взаємодії полів. Механізм перетворення властивостей наноматеріалів в процесі нанорізання.

Трансформація механізмів матеріалів при стружкоутворенні в системах нанорізання. Передумови трансформації механізмів стружкоутворення. Роль гідростатичного тиску. Фактори, що формують стан матеріалу при поверхневих шарів і їхні функціональні властивості.

Алмазне наноточіння крихких матеріалів. Особливості різання наноструктурованих матеріалів. Причини й умови зміни похідних властивостей оброблюваних наноструктурованих матеріалів.

Роль моделювання у вивченні процесів мікро- та нанообробки. Загальна характеристика методу молекулярної динаміки (MD) і моделювання процесу мікро- і нанорізання як можливості маніпулювання величезними кількостями атомів і молекул. Прилади MD моделювання процесу мікро- та нанорізання.

Застосування методу молекулярної динаміки для дослідження процесів мікро- і нанорізання матеріалів на атомно-молекулярному рівні.

Моделювання ортогонального мікро- і нанорізання. MD моделювання процесів мікро- і нанорізання в пластичному режимі стружкоутворення.

Особливості моделювання процесу мікро- і нанорізання крихких матеріалів. Особливості формулювання поверхні і при поверхневих шарів.

Сили різання, температура та напруження при мікро- і нанорізанні. Сили різання в нанометричному діапазоні. Напруження при мікро- і нанорізанні. Визначення температури мікро- і нанорізання.

Умови реалізації процесів мікро- і нанорізання при шліфуванні. Сфери застосування мікро- і наношліфування. Загальна характеристика мікро- і наношліфування. Класифі-

кація процесів мікро- і наношліфування. Умови переходу від крихкого до пластичного режиму мікро- і наношліфування. Якість обробки поверхні.

Роль абразивних інструментів при реалізації процесу мікро- і наношліфування. Класифікація абразивних інструментів, що застосовуються при мікро- і нанорізання. Вплив абразивних зерен на процес мікро- і нанорізання. Роль зв'язки в реалізації процесу мікро- і наношліфування.

Керування станом абразивних інструментів в манометричному діапазоні. Оптимізація процесу мікро- і наношліфування. Застосування ЗОТС. Моделювання повної тривимірної обробки поверхні.

Властивості оброблюваних наноструктурованих матеріалів і вибір інструментального забезпечення. Контактні явища і вибір режимів різання.

Сфери застосування і тенденції розвитку способів мікро- і нанорізання.

Приложение В

Распределение учебного времени по семестрам и видам учебных занятий

Семестр	Загальний обсяг (годин) / кредитів ECTS *	З них		За видами навчальних занять (годин)							Індивідуальні заняття студентів**				Терміни практики	Контрольні заходи**					Звітність**	
		Аудиторні заняття (годин)	Самостійні заняття студентів (годин)	Лекції	Лабораторні заняття	Практичні заняття	Семінари	Консультації	Самостійна робота під керівництвом викладача		Курсовий проект (робота) (КП, КР)	ОДЗ (ІЗ)	РГЗ (Р, РГ)	ІТР (РЕ)		Модульна контрольна робота №1	Модульна контрольна робота №2	Контрольна робота	Колоквіум		Залік	Екзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	72/2	32	40	28												2	2					+

* кількість кредитів базового обсягу

** наявність індивідуальних завдань, контрольних заходів та звітність проставляється знаком +

Приложение Г
Производственные функции, типовые задачи деятельности и умения,
которыми должен владеть выпускник высшего учебного заведения

Зміст виробничої функції	Назва типової задачі діяльності	Шифр типової задачі діяльності	Зміст уміння	Шифр уміння
1	2	3	4	5
Проектна	Проектування на-нооб'єктів системи нанорізання	ПФ.С.01	Вміти проектувати на-норозмірні параметри об'єктів системи нано-різання	ПФ.С.01.ПР.0.01
	Проектування технологічних процесів мікро- і нанорізання	ПФ.С.02	Вміти розробити технологічний процес мікро- і нанорізання	ПФ.С.02.ПР.0.01
	Проектування моделі молекулярної динаміки процесів мікро- і нанорізання	ПФ.С.03	Вміти проектувати модель молекулярної динаміки процесів різання на нанорівні	ПФ.С.03.ПР.0.01
Технологічна	Оптимальне використання фізико-хімічних методів обробки	ПФ.Д.01	Вміти запропонувати найбільш ефективний фізико-хімічний метод обробки там, де традиційні методи малоефективні	ПФ.Д.01.ПР.0.01
			Запропонувати необхідне обладнання, інструмент та пристрої для виконання фізико-хімічних методів обробки залежно від конкретних умов виробництва	ПФ.Д.01.ПР.0.02

Продолжение табл.

1	2	3	4	5
Аналітична	Системний аналіз технологічних процесів з фізико-хімічними методами обробки на нанорівні	ПФ.Д.02	Вміти застосовувати методи системного підходу при розробці оптимальних технологічних процесів мікро- і нанорізання	ПФ.Д.02.ПР.0.01
			Володіти термінологією, яка застосовується в мікро- і нановиробництві	ПФ.Д.02.ПР.0.02
Прогностична	Прогнозування параметрів якості оброблених поверхонь	ПФ.Е.01	Вміти формулювати вимоги до геометричної точності і якості приповерхневого шару матеріалу обробленої поверхні	ПФ.Е.01.ПР.0.01
Впровадницька	Впровадження технологічних процесів у виробництво	ПФ.Д.03	Впровадження технологічного процесу мікро- і нанорізання	ПФ.Д.03.ПП.0.01
			Впровадження технологічних процесів з фізико-хімічними методами обробки на нанорівні	ПФ.Д.03.ПП.0.02
Експлуатаційна	Експлуатація обладнання, яке використовується в мікро- і нановиробництві	ПФ.С.01	Вміти підібрати оптимальні умови експлуатації обладнання на конкретному мікро- і нановиробництві	ПФ.С.01.ПР.0.01

Приложение Д
Система блоков содержательных модулей

Зміст уміння, що забезпечується	Шифр уміння	Назва змістовного моду- ля	Шифр змістовного модуля	Мінімальна кількість навчальних годин вивчення модуля
1	2	3	4	5
Вміти проектувати нанорозмірні параметри об'єктів системи нанорізання	ПФ.С.01.ПР.0.01	Нанооб'єкти системи нанорізання та способи отримання наноструктурованих матеріалів	ПФ.С.01.ПР.0.01.01	2
Вміти проектувати модель молекулярної динаміки процесів різання на нанорівні	ПФ.С.03.ПР.0.01	Загальна характеристика і можливості застосування методу молекулярної динаміки для вивчення процесів нанорізання матеріалів	ПФ.С.03.ПР.0.01.01	8
Вміти формулювати вимоги до геометричної точності і якості приповерхневого шару матеріалу обробленої поверхні	ПФ.Е.01.ПР.0.01		ПФ.Е.01.ПР.0.01.01	
Вміти розробити технологічний процес мікро- і нанорізання	ПФ.С.02.ПР.0.01	Нанопроцеси, які відбуваються в системі нанорізання матеріалів. Особливості механізмів взаємодії інструменту з оброблюваними матеріалами і стружкою в нанометричному діапазоні	ПФ.С.02.ПР.0.01.01	6
Вміти запропонувати найбільш ефективний фізико-хімічний метод обробки там, де традиційні методи малоефективні	ПФ.Д.01.ПР.0.01		ПФ.Д.01.ПР.0.01.02	
Впровадження технологічних процесів з фізико-хімічними методами обробки на нанорівні	ПФ.Д.03.ПП.0.02		ПФ.Д.03.ПП.0.02.01	

Продолжение табл.

1	2	3	4	5
Запропонувати необхідне обладнання, інструмент та пристрої для виконання фізико-хімічних методів обробки залежно від конкретних умов виробництва	ПФ.Д.01.ПР.0.02	Основні властивості наноматеріалів системи нанорізання. Властивості конструкційних і інструментальних наноматеріалів та нанопокриття	ПФ.Д.01.ПР.0.02.01	4
Вміти застосовувати методи системного підходу при розробці оптимальних технологічних процесів мікро- і нанорізання	ПФ.Д.02.ПР.0.01		ПФ.Д.02.ПР.0.01.01	
Володіти термінологією, яка застосовується в мікро- і нановиробництві	ПФ.Д.02.ПР.0.02	Основні поняття і визначення	ПФ.Д.02.ПР.0.02.01	2
Впровадження технологічного процесу мікро- і нанорізання	ПФ.Д.03.ПП.0.01	Характеристика процесів мікро- і наношліфування	ПФ.Д.03.ПП.0.01.01	6
Вміти підібрати оптимальні умови експлуатації обладнання на конкретному мікро- і нановиробництві	ПФ.С.01.ПР.0.01		ПФ.С.01.ПР.0.01.01	

Приложение Е

План изучения учебной дисциплины

Порядковий номер заняття	Види навчальних занять (Л; ЛЗ; ПЗ; С, М)	Кількість годин	Номери семестрів, найменування тем і питань кожного заняття. Завдання на самостійну роботу студентам	Потрібний рівень сформованості знань та умінь для кожного питання	Інформаційно-методичне забезпечення
1	2	3	4	5	6
			Модуль № 1 Реалізація процесу мікро- і нанорізання в системі нанорізання / 1 кредит ECTS		
1	Л1	2	Основні поняття і визначення	31	
2	Л2	2	Нанооб'єкти системи нанорізання. Способи отримання наноструктурованих матеріалів. Нанотехнології в виготовленні різальних інструментів, як нанооб'єктів системи нанорізання	31	
3	Л3	2	Властивості конструкційних наноматеріалів. Фактори, які визначають особливі властивості наноматеріалів	31	
4	Л4	2	Властивості інструментальних наноматеріалів і нанопокриттів	31	
5	Л5	2	Умови реалізації процесу мікро- і нанорізання. Нанопроцеси, які відбуваються в системі нанорізання матеріалів. Особливості механізмів взаємодії інструменту з оброблюваними матеріалами і стружкою в нанометричному діапазоні	31	
6	Л6	2	Трансформація механізмів руйнування матеріалів при утворенні стружки в системах нанорізання	31	
7	Л7	2	Алмазне наноточіння крихких матеріалів. Особливості різання наноструктурованих матеріалів	31	
8	М1	2	Модульна контрольна № 1		

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6
			Модуль № 2 Моделювання процесів нанорізання матеріалів. Умови реалізації процесів мікро- і наношліфування. / 1 кредит ECTS		
9	Л8	2	Загальна характеристика методу молекулярної динаміки в процесах моделювання нанорізання	31	
10	Л9	2	Можливості застосування методу молекулярної динаміки для вивчення процесів нанорізання матеріалів. Моделювання процесів нанорізання при утворенні стружки в пластичному режимі	31	
11	Л10	2	Моделювання процесу нанорізання крихких матеріалів. Особливості формування поверхні і приповерхневого шару	31	
12	Л11	2	Сили різання, температура і напруги при нанорізанні	31	
13	Л12	2	Характеристика процесу наношліфування. Перехід від крихкого до пластичного режиму наношліфування важкооброблюваних матеріалів	31	
14	Л13	2	Роль абразивних інструментів при реалізації процесів мікро- і наношліфування	31	
15	Л14	2	Керування станом інструменту при мікро- і наношліфуванні. Моделювання повної тривимірної обробки поверхні. Порівняння процесів традиційного і мікро- нанорізання	31	
16	М2	2	Модульна контрольна № 2	31	
Усього		32		31	

Приложение Ж
Способы проведения поточного контроля

Коли проводяться (№ занять)	Варіанти і зміст модульних контрольних робіт (контрольних робіт)	Терміни проведення (на якому тижні семестру)
1	2	3
8	Модульна контрольна робота № 1	8
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наведіть основні поняття і визначення, які відносяться до нанометричного діапазону процесу різання. 2. Охарактеризуйте системи нанорізання трьох рівнів. 3. Дайте характеристику нанооб'єктам системи нанорізання. 4. Обґрунтуйте, чи можна вважати наносистемою різання систему, в якій не всі складові можна віднести до нанооб'єктів. 5. Які способи отримання наноматеріалів вам відомі? 6. Наведіть класифікацію наноматеріалів. 7. Охарактеризуйте нанотехнології в інструментальному виробництві. 8. Які фактори визначають особливі властивості наноматеріалів? 9. Охарактеризуйте властивості конструкційних наноматеріалів. 10. Порівняйте фізико-механічні та інші властивості наноматеріалів з макрооб'єктами. 11. Який вплив має розмір зерна на механічні властивості наноматеріалів? 12. Яку роль відіграє поверхневий шар атомів в наноструктурованих матеріалах? 13. Порівняйте властивості традиційних і наноструктурованих покриттів. 	

1	2	3
	<p>14. Охарактеризуйте властивості інструментальних наноматеріалів і нанопокриттів.</p> <p>15. У чому ви бачите потенціал застосування наноструктурованих матеріалів і покриттів?</p> <p>16. Завдяки яким умовам реалізується процес нанорізання?</p> <p>17. Опишіть явища, які виникають при взаємодії різального інструменту і оброблюваного матеріалу на нанорівні.</p> <p>18. Охарактеризуйте нанопроцеси, які відбуваються в системі нанорізання матеріалів.</p> <p>19. Зазначте особливості механізмів взаємодії інструмента з оброблюваними матеріалами та стружкою в нанометричному діапазоні.</p> <p>20. Дайте визначення процесу нанорізання з точки зору взаємодії енергетичних полів.</p> <p>21. Назвіть фактори, що впливають на трансформацію механізмів руйнування в зоні нанорізання.</p> <p>22. Вкажіть передумови, при яких реалізується пластичний та крихкий режими утворення стружки.</p> <p>23. Порівняйте пластичний та крихкий режими утворення стружки.</p> <p>24. Яку роль відіграє гідростатичний тиск при реалізації пластичного режиму стружкоутворення?</p> <p>25. Який вплив має товщина зрізу і величина радіусу заокруглення ріжучої кромки на режим утворення стружки?</p> <p>26. Охарактеризуйте вплив режиму стружкоутворення на якість обробленої поверхні.</p> <p>27. Дайте характеристику процесу алмазного наноточіння крихких матеріалів.</p> <p>28. Порівняйте процеси різання звичайних і наноматеріалів.</p> <p>29. Охарактеризуйте особливості процесу різання наноструктурованих матеріалів.</p> <p>30. Дайте характеристику впливу режимів різання на вихідні властивості наноматеріалів.</p>	

1	2	3
16	Модульна контрольна робота № 2	16
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Дайте характеристику методу молекулярної динаміки. 2. Які ви бачите можливості застосування методу молекулярної динаміки для вивчення процесів мікро- і нанорізання? 3. Яку роль відіграє метод молекулярної динаміки при дослідженні процесів мікро- і нанорізання? 4. Опишіть взаємодію нанооб'єктів системи нанорізання при дослідженні процесів мікро- і нанорізання за допомогою методу молекулярної динаміки. 5. Охарактеризуйте моделювання процесів нанорізання крихких матеріалів в пластичному режимі стружкоутворення. 6. Опишіть процеси, які виникають в зоні деформації при нанометричному різанні. 7. Охарактеризуйте температуру, сили різання і напруги, які виникають в зоні нанорізання. 8. Яке значення мають радіус заокруглення різальної кромки та товщина зрізу для реалізації ефективного процесу мікро- і нанорізання? 9. У чому ви бачите потенціал та перспективи застосування методу молекулярної динаміки при дослідженні процесів мікро- і нанорізання? 10. Завдяки яким умовам, реалізується процес мікро- і наношліфування? 11. Порівняйте процеси наношліфування з іншими видами нанобробки. 12. Дайте характеристику процесам мікро- і наношліфування. 13. Наведіть умови переходу від крихкого до пластичного режиму наношліфування важкооброблюваних матеріалів. 14. Які фактори визначають механізм видалення матеріалу при мікро- наношліфуванні. 15. Опишіть роль абразивних зерен при реалізації процесу наношліфування 	

1	2	3
	<p>16. Охарактеризуйте якість оброблених поверхонь, утворених за допомогою процесів мікро- і нанорізання.</p> <p>17. Опишіть механізм видалення матеріалу та структуру приповерхневого шару при мікро- і наношліфуванні.</p> <p>18. Яку роль відіграють абразивні інструменти при реалізації процесів мікро- і наношліфування?</p> <p>19. Охарактеризуйте абразивні інструменти для утворення мікроструктур.</p> <p>20. Наведіть класифікацію абразивних інструментів, які застосовуються при мікро- і наношліфуванні.</p> <p>21. В чому ви бачите переваги використання шліфувальних інструментів з визначеним розташуванням абразивних зерен?</p> <p>22. Яке значення має зв'язка для реалізації процесу шліфування на нанорівні?</p> <p>23. Опишіть способи керування станом робочої поверхні інструменту при мікро- і наношліфуванні.</p> <p>24. Порівняйте електророзрядний метод (ЕРМ) з електрохімічним методом (ЕХМ) керування станом робочої поверхні інструменту при мікро- і наношліфуванні.</p> <p>25. Наведіть та обґрунтуйте блок схему мікро- наношліфування.</p> <p>26. Який вплив має СОТС на процеси, які протікають під час наношліфування?</p> <p>27. Наведіть та обґрунтуйте структурну схему оптимізації процесу шліфування.</p> <p>28. Дайте характеристику методу моделювання повної тривимірної обробки поверхонь.</p> <p>29. Порівняйте процеси мікро- і нанорізання.</p> <p>30. У чому ви бачите потенціал застосування процесів нанорізання?</p>	

Приложение 3

Комплексная контрольная работа

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Машинобудівний факультет

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»

Спеціальність 7.05050201 «Технологія машинобудування»

КОМПЛЕКСНА КОНТРОЛЬНА РОБОТА (ККР)

з дисципліни «Процеси мікро- і нанорізання матеріалів»

Завдання (два запитання) на виконання роботи за 2 академічні години.

1. Наведіть основні поняття і визначення, які відносяться до нанометричного діапазону процесу різання.
2. У чому ви бачите потенціал застосування процесів нанорізання?
3. Охарактеризуйте системи нанорізання трьох рівнів.
4. Порівняйте процеси мікро- і нанорізання.
5. Дайте характеристику нанооб'єктам системи нанорізання.
6. Дайте характеристику методу моделювання повної тривимірної обробки поверхонь.
7. Обґрунтуйте, чи можна вважати наносистемою різання систему, в якій не всі складові можна віднести до нанооб'єктів.
8. Наведіть та обґрунтуйте структурну схему оптимізації процесу шліфування.
9. Які способи отримання наноматеріалів вам відомі?
10. Який вплив має СОТС на процеси, які протікають під час наношліфування?
11. Наведіть класифікацію наноматеріалів.
12. Наведіть та обґрунтуйте блок схему мікро- наношліфування.
13. Охарактеризуйте нанотехнології в інструментальному виробництві.
14. Порівняйте електророзрядний метод (ЕРМ) з електрохімічним методом (ЕХМ) керування станом робочої поверхні інструменту при мікро- і наношліфуванні.
15. Які фактори визначають особливі властивості наноматеріалів?
16. Опишіть способи керування станом робочої поверхні інструменту при мікро- і наношліфуванні.
17. Охарактеризуйте властивості конструкційних наноматеріалів.
18. Яке значення має зв'язка для реалізації процесу шліфування на нанорівні?

19. Порівняйте фізико-механічні та інші властивості наноматеріалів з макрооб'єктами.
20. В чому ви бачите переваги використання шліфувальних інструментів з визначеним розташуванням абразивних зерен?
21. Який вплив має розмір зерна на механічні властивості наноматеріалів?
22. Наведіть класифікацію абразивних інструментів, які застосовуються при мікро- і наношліфуванні.
23. Яку роль відіграє поверхневий шар атомів в наноструктурованих матеріалах?
24. Охарактеризуйте абразивні інструменти для утворення мікроструктур.
25. Порівняйте властивості традиційних і наноструктурованих покриттів.
26. Яку роль відіграють абразивні інструменти при реалізації процесів мікро- і наношліфування?
27. Охарактеризуйте властивості інструментальних наноматеріалів і нанопокриттів.
28. Опишіть механізм видалення матеріалу та структуру приповерхневого шару при мікро- і наношліфуванні.
29. У чому ви бачите потенціал застосування наноструктурованих матеріалів і покриттів?
30. Охарактеризуйте якість оброблених поверхонь, утворених за допомогою процесів мікро- і нанорізання.
31. Завдяки яким умовам реалізується процес нанорізання?
32. Опишіть роль абразивних зерен при реалізації процесу шліфування на нанорівні?
33. Опишіть явища, які виникають при взаємодії різального інструменту і оброблюваного матеріалу на нанорівні.
34. Які фактори визначають механізм видалення матеріалу при мікро- наношліфуванні.
35. Охарактеризуйте нанопроцеси, які відбуваються в системі нанорізання матеріалів.
36. Наведіть умови переходу від крихкого до пластичного режиму наношліфування важкооброблюваних матеріалів.
37. Зазначте особливості механізмів взаємодії інструмента з оброблюваними матеріалами та стружкою в нанометричному діапазоні.
38. Дайте характеристику процесам мікро- і наношліфування.
39. Дайте визначення процесу нанорізання з точки зору взаємодії енергетичних полів.
40. Порівняйте процеси наношліфування з іншими видами нанообробки.
41. Назвіть фактори, що впливають на трансформацію механізмів руйнування в зоні нанорізання.
42. Завдяки яким умовам, реалізується процес мікро- і наношліфування?
43. Вкажіть передумови, при яких реалізується пластичний та крихий режими утворення стружки.
44. У чому ви бачите потенціал та перспективи застосування методу молекулярної динаміки при дослідженні процесів мікро- і нанорізання?

45. Порівняйте пластичний та крихкий режими утворення стружки.
46. Яке значення мають радіус заокруглення різальної кромки та товщина зрізу для реалізації ефективного процесу мікро- і нанорізання?
47. Яку роль відіграє гідростатичний тиск при реалізації пластичного режиму стружкоутворення?
48. Охарактеризуйте температуру, сили різання і напруги, які виникають в зоні нанорізання.
49. Який вплив має товщина зрізу і величина радіусу заокруглення ріжучої кромки на режим утворення стружки?
50. Опишіть процеси, які виникають в зоні деформації при нанометричному різанні.
51. Охарактеризуйте вплив режиму стружкоутворення на якість обробленої поверхні.
52. Охарактеризуйте моделювання процесів нанорізання крихких матеріалів в пластичному режимі стружкоутворення.
53. Дайте характеристику процесу алмазного наноточіння крихких матеріалів.
54. Опишіть взаємодію нанооб'єктів системи нанорізання при дослідженні процесів мікро- і нанорізання за допомогою методу молекулярної динаміки.
55. Порівняйте процеси різання звичайних і наноматеріалів.
56. Яку роль відіграє метод молекулярної динаміки при дослідженні процесів мікро- і нанорізання?
57. Охарактеризуйте особливості процесу різання наноструктурованих матеріалів.
58. Які ви бачите можливості застосування методу молекулярної динаміки для вивчення процесів мікро- і нанорізання?
59. Дайте характеристику впливу режимів різання на вихідні властивості наноматеріалів.
60. Дайте характеристику методу молекулярної динаміки.

ККР затверджено на засіданні кафедри, протокол № . . . р.

Завідувач кафедри

ККР затверджено Радою факультету, протокол № . . . р.

Декан факультету

Приложение И

Критерии оценки выполнения заданий

Критерії оцінки виконання завдань

комплексної контрольної роботи для оцінювання рівня професійної підготовки спеціалістів зі спеціальності 7.05050201 «Технологія машинобудування» з дисципліни «Процеси мікро- і нанорізання матеріалів».

Загальна оцінка виводиться як середня по всіх пунктах завдання.

«Відмінно» – виставляється студенту, якщо його відповіді на завдання свідчать про глибокі, всебічні знання навчально-програмного матеріалу, основної й додаткової літератури, рекомендованої програмами по дисциплінам, який повно відповідав на всі запитання, а також показав здібності самостійно і творчо аналізувати основні положення завдяки, яким реалізуються процеси мікро- та нанорізання. Відмінна робота може бути виконана з однією незначною помилкою.

«Добре» – виставляється студенту, який при виконанні завдання продемонстрував засвоєння навчально-програмного матеріалу, основної літератури, успішно відповідав на запитання. Оцінка «добре» виставляється студентам, які показали достатні знання, здібність самостійного мислення та виконання завдань з декількома значними помилками.

«Задовільно» – виставляється студенту, який, відповідаючи на завдання, виявив знання основного програмного матеріалу в обсязі який вимагає подальшого поглиблення знань для успішної роботи за фахом. Оцінка «задовільно» виставляється тим студентам, які допустили помилки при відповіді на запитання або мають потенційні можливості для їх засвоєння під керівництвом викладача.

«Незадовільно» – виставляється студенту, який при відповіді на питання не показав достатніх знань навчально-програмного матеріалу, допустив серйозні помилки при виконанні завдання, що змінюють смислові значення представлених відповідей

Викладач

(Підпис)

/ _____ /

Приложение К

Информационно-методическое и материальное обеспечение

№ п/п	Назва підручників, навчальних посібників, методичних вказівок, каталог інформаційного і матеріального забезпечення	Де застосо- вується
1	2	3
1	Балабанов В.И. Нанотехнологии. Наука будущего / В.И. Балабанов. – М. : ЭКСМО, 2009. – 131 с.	
2	Головин Ю.И. Введение в нанотехнику / Ю.И. Головин. – М : Машиностроение, 2007. – 496 с.	
3	Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Грабченко А.И., Внуков Ю.Н., Доброскок В.Л. и др. ; под ред. А.И. Грабченко – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 396 с. – Текст: рус.	
4	Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси ; перев. с японского. – 2-изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 134 с.	
5	Грабченко А.И. Введение в нанотехнологии : текст лекций / А.И. Грабченко, Л.И. Пупань, Л.Л. Товажнянский. – Харьков : НТУ «ХПИ», ЧПИ «Новое слово», 2012. – 288 с.	
6	Пул Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2005. – 336 с.	
7	Davim J. Paulo. Nano and Micromachining / Davim J. Paulo, Jackson J. Mark. – London : ISTE, Wiley, 2009. – 312 p.	
8	Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения : учебн. пос. / Б.М. Белоян, А.Г. Колмаков, М.И. Алымов и др. – М. : АгроПрессДизайн, 2007. – 102 с.	
9	Шевченко В.Я. О терминологии: наночастицы, наносистемы, нанокompозиты, нанотехнологии / В.Я. Шевченко // Микросистемная техника. – 2004. – № 9. – С. 2–4.	
10	Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Вагуля. – М. : Академия, 2005. – 117 с.	
11	Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М. : Физматлит, 2005. – 416 с.	
12	Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии / Азаренков Н.А., Береснев В.М и др. – Харьков : ХНУ им. В.Н.Каразина, 2009. – 209 с.	
13	Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех / М. Рыбалкина. – М. : Nanotechnology News Network, 2005. – 444 с.	

1	2	3
14	Лякишев Н.П. Нанокристаллические структуры – новое направление развития конструкционных материалов / Н.П. Лякишев // Вестник РАН. – 2003. – Т. 3. – № 5. – С. 422–428.	
15	Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / А.І. Грабченко, М.В. Вerezуб, Ю.М. Внуков та ін. ; за ред. А.І. Грабченко. – Житомир : ЖДТУ, 2011. – 507 с.	
16	Нанослоистые композиционные материалы и покрытия / Шпак А.П., Майборода В.П., Кульницкий Ю.А. и др. – К. : Академическая периодика, 2004. – 164 с.	
17	Шейнман Е. Сверхтвердые покрытия из нанокompозитов. Обзор зарубежной литературы / Е. Шейнман // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 12 (642). – С. 41–46.	
18	Локтев Д. Основные виды износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин. – М. : Наноиндустрия, 2007. – Вып. 5. – С. 24–30.	
19	Ярославцев В.М. Нанопроцессы при обработке резанием / В.М. Ярославцев // Нанотехнологии: наука и производство. – 2009. – Вып. 4(5). – С. 10–15.	
20	Салищев Г.А. Формирование субмикрокристаллической структуры в титане и титановых сплавах и их механические свойства / Г.А. Салищев, Р.М. Галеев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2006. – № 2. – С. 19–26.	
21	Симонова А.А. Определение рациональных параметров лезвийной обработки субмикрокристаллических металлов для сохранения исходных свойств заготовок : канд. дисс. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2010. – 210 с.	
22	Вerezуб Н.В. Управление качеством поверхностного слоя металла с нано- и субмикрокристаллической структурой в процессе обработки / Н.В. Вerezуб, Дж. Каптай, А.А. Симонова. // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2010. – Вып. 5. – С. 244–249.	

Список рекомендуемой литературы

1. Балабанов В.И. Нанотехнологии. Наука будущего / В.И. Балабанов. – М. : ЭКСМО, 2009. – 131 с.
2. Введение в организацию производства : учеб. пособие / Весткемпер Э., Декер М., Ендоуби Л. и др. ; под общ. ред. А.И. Грабченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – 376 с.
3. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику / Ю.И. Головин. – М : Машиностроение, 2007. – 496 с.
4. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Грабченко А.И., Внуков Ю.Н., Доброскок В.Л. и др. ; под ред. А.И. Грабченко – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 396 с. – Текст: рус.
5. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси ; перев. с японского. – 2-изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 134 с.
6. Пул Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2005. – 336 с.
7. Davim J. Paulo. Nano and Micromachining / Davim J. Paulo, Jackson J. Mark. – London : ISTE, Wiley, 2009. – 312 p.
8. Грабченко А.И. Введение в нанотехнологии : текст лекций / А.И. Грабченко, Л.И. Пупань, Л.Л. Товажнянский. – Харьков : НТУ «ХПИ», ЧПИ «Новое слово», 2012. – 288 с.
9. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения : учебн. пос. / Б.М. Белоян, А.Г. Колмаков, М.И. Алымов и др. – М. : АгроПрессДизайн, 2007. – 102 с.
10. Шевченко В.Я. О терминологии: наночастицы, наносистемы, нанокompозиты, нанотехнологии / В.Я. Шевченко // Микросистемная техника. – 2004. – № 9. – С. 2–4.
11. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Вагуля. – М. : Академия, 2005. – 117 с.
12. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М. : Логос, 2000. – 272 с.
13. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М. : Физматлит, 2005. – 416 с.
14. Лякишев Н.П. Нанокристаллические структуры – новое направление развития конструкционных материалов / Н.П.Лякишев // Вестник РАН. – 2003. – Т. 3. – № 5. – С. 422–428.

15. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concept and microstructure / H.Gleiter // *Acta Mater.* –2000. – V. 48. – P. 1–29.
16. Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні : підруч. для студ. вищ. навч. закл. / А.І. Грабченко, М.В. Вerezуб, Ю.М. Внуков та ін. ; за ред. А.І. Грабченко. – Житомир : ЖДТУ, 2011. – 507 с.
17. Нанослоистые композиционные материалы и покрытия / Шпак А.П., Майборода В.П., Кульницкий Ю.А. и др. – К. : Академическая периодика, 2004. – 164 с.
18. Шейнман Е. Сверхтвердые покрытия из нанокompозитов. Обзор зарубежной литературы / Е. Шейнман // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2008. – №12 (642). – С. 41–46.
19. Локтев Д. Основные виды износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин. – М. : Наноиндустрия, 2007. – Вып. 5. – С. 24–30.
20. Ярославцев В.М. Нанопроцессы при обработке резанием / В.М. Ярославцев // *Нанотехнологии: наука и производство.* – 2009. – Вып. 4(5). – С. 10–15.
21. Cheong W.C.D. Molecular dynamics simulation of phase transformation in silicon monocrystals due to nanoindentation / Cheong W.C.D., Zhang L.C. // *Nanotechnology.* – 2000. – Vol. 31. – P. 425–433.
22. Rentsch R. Investigation of Surface Integrity by Molecular Dynamics Simulation / Rentsch R., Inasaki I. // *Annals of the CIRP, Hallway Publ.* – Berne, CH. – 1995. – Vol. 44/1. – P. 295–298.
23. Shimada Sh. Structure of Micromachined Surface Simulated by Molecular Dynamics Analysis / Shimada Sh., Ikawa N., Tanaka H. // *Annals of the CIRP.* – 1994. – Vol. 43/1. – P. 51–54.
24. Komanduri R. Molecular dynamics simulation of the nanometric cutting of silicon / Komanduri R., Chandrasekaraw N., Raff L.M. // *Philosophical Magazine B.* – 2001. – Vol. 81. – P. 1989–2019.
25. Ikawa N., Shimada Sh., Tanaka H., Ohmori G.: An atomistic analysis of nanometric Chip Removal as Affected by Tool-work Interaction in Diamond Turning. *Annals CIRP, Vol. 40/1, 1991, pp. 551–554.*
26. Cai M. Molecular dynamics modeling and simulation of nanoscale ductile cutting of silicon / Cai M., Rahman M. // *International Journal of Computer Application in Technology.* – 2007. – Vol. 28. – № 1. – P. 2–8.
27. Moriwaki T. Combined stress, material flow and heat analysis of orthogonal micromachining of copper / Moriwaki T., Sugimura K., Luan S. // *Annals CIRP.* – 1993. – Vol. 42/1. – P. 75–78.

28. Nanoprecision measurement of diamond tool edge radius for wafer fabrication / Li X.P., Rahman M., Neo K.S., Chan C.C. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 140. – P. 358–362.
29. Leung T.P. Diamond Turning of silicon substrates in ductile-regime / Leung T.P., Lee W.B., Lu X.M. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1998. – Vol. 73. – P. 42–48.
30. Taniguchi N. *Nanotechnology* / Taniguchi N. // Oxford University Press. – New York. – 1996.
31. Симонова А.А. Определение рациональных параметров лезвийной обработки субмикроструктурированных металлов для сохранения исходных свойств заготовок : канд. дисс. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2010. – 210 с.
32. Вережуб Н.В. Управление качеством поверхностного слоя металла с нано- и субмикроструктурной структурой в процессе обработки / Н.В. Вережуб, Дж. Каптай, А.А. Симонова. // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2010. – Вып. 5. – С. 244–249.
33. Horvath M. Micromachining of Micro / Horvath M., Nyiro J. // *Nanostructured Metals*. – P. 236–243.
34. Chao C.L. Ductile Behaviour in Single-point Diamond Turning of Single-crystal Silicon / Chao C.L. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. – Vol. 127. – P. 187–190.
35. Mark J. Jackson. *Machining with Abrasives* / Mark J. Jackson, J. Paulo Davim // Springer, New York. – 2010. – P. 318–319.
36. US Patent № 20050129975. Metal-coated Abrasives, Grinding Wheel Using Metal-coated Abrasives and Method of Producing Metal-coated Abrasives / Ihara E. – 2005.
37. Brinksmeier E. Superfinishing and Grind-strengthening with Elastic Bonding System / Brinksmeier E., Heinzl C., Bleil N. // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209. – P. 6117–6123.
38. Klink A. Funkenerosives und elektrochemisches Abrichten feinko. Ringer Schleifwerkzeuge / Klink A. // German Ph.D. Thesis, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. – 2009.
39. Ohmori H. Analysis of Morror Surface Generation of Hard and Brittle Materials by ELID (Electrolytic In-Process Dressing) Grinding with Superfine Grain Metallic Bond Wheels / Ohmori H., Nakagawa T. // *Annals of the CIRP* / – 1995. – Vol. 44(1). – P. 287–290.

40. Development on Micro Precision Truing Method of ELID-Grinding Wheel (1st Report: Principle and Fundamental Experiments) / Ohmori H., Yin S., Lin W. et al. // Key Engineering Materials. – 2005. –Vol. 291–292. – P. 207–212.

41. König W. Auswahl von Diamantwerkzeugen für die Kugelbearbeitung optischer Gläser / König W., Meis F.U., Pahl F. // Industrial Diamond Review. – 1984. – Vol. 18(3). – P. 136–143.

Навчальне видання

ГРАБЧЕНКО Анатолій Іванович
ЛИМАР Євген Олександрович
ФАДЄЄВ Валерій Андрійович

ПРОЦЕСИ МІКРО- ТА НАНОРІЗАННЯ МАТЕРІАЛІВ

Текст лекцій

для студентів інженерних спеціальностей
денної та заочної форм навчання

Російською мовою

Відповідальний за випуск А.І. Грабченко

Роботу до видання рекомендував О.М. Шелковой

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка та макетування В.О. Склепус

План 2013 р., поз. 78

Підп. до друку 18.06.2013 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний. Riso-друк.
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 10,2. Наклад 100 прим. Зам. № 485.
Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня ДП ХМЗ «ФЕД»

Україна, 61023, Харків, вул. Сумська, 132

Тел./факс: (057) 719-67-82

